

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Vliv změny proudění spalovacího vzduchu
na emise, výkon a účinnost kotle Hefaistos
P1 3- článkový

Effect of Changes in the Flow of Combustion
Air on Emissions, Output and Efficiency of
the Boiler Hefaistos P1 3-cell

Student:

Bc. Jiří Klimčík

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Stáňa, PhD.

Ostrava 2014

KOPIE ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Klimčík**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Vliv změny proudění spalovacího vzduchu na emise, výkon a účinnost
kotle Hefaistos P1 3-člankový**
**Effect of Changes in the Flow of Combustion Air on Emissions, Output
and Efficiency of the Boiler Hefaistos P1 3-cell**

Zásady pro vypracování:

1. Přehled vyráběných kotlů
2. Popis kotle Hefaistos P1
3. Srovnání zplyňovacích kotlů
4. Princip spalování dřeva ve zplyňovacím kotli
5. Stechiometrie spalování podle ČSN EN 304
6. Stanovení emisí, výkonu a účinnosti stávajícího kotle
7. Návrh úprav
8. Stanovení emisí, výkonu a účinnosti po úpravě

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN EN 303-5. *Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení.* Praha: Český normalizační institut, 2013.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

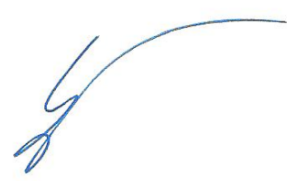
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Stáňa, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




prof. Ing. Dagmar Buchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě: 19. 5. 2014



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užití své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19. 5. 2014



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jiří Klimčík

Adresa trvalého pobytu autora práce: Václava Jiříkovského 27/167 , Ostrava, 700 30

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KLIMČÍK, J. *Vliv změny proudění spalovacího vzduchu na emise, výkon a účinnost kotle Hefaistos P1 3- článkový: diplomová práce*. Ostrava: VŠB- Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky 2014, 97 s. Vedoucí práce: Stáňa, M.

Diplomová práce se zabývá změnou proudění spalovacího vzduchu v kotli Hefaistos P1 a následným vlivem na parametry, mezi hlavní patří výkon, účinnost a emise. Je popsán detailně princip zplyňovacího kotle. Dále jsou zde popsány obecné stechiometrické výpočty spalování, výpočet výkonu a účinnosti podle ČSN 303-5 a sdílení tepla mezi vzduchem a násypkou. Byly provedeny výpočty podle ČSN 303-5. A nakonec byla zpracována výkresová dokumentace jako jednotlivé sestavy dílů.

KLIMČÍK, J. *Effect of Changes in the Flow of Combustion Air on Emissions, Output and Efficiency of the Boiler Hefaistos P1 3-cell: thesis*. Ostrava: VŠB- Technical University of Ostrava Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering 2014, 97 s. Thesis head: Stáňa, M.

This thesis deals with changing the flow of combustion air in the boiler Hefaistos P1 and consequent effect to thermotechnical parameters, the main one of performance, efficiency and emissions. It describes in detail the principle of gasification boiler. Additionally, there is a general stoichiometric combustion calculations, calculation of performance and efficiency according to ČSN 303-5 and heat transfer between air and boiler walls. In the end was drawing documentation as assembly parts.

Klíčová slova

- Zplyňovací kotel
- Účinnost
- ČSN 303-5
- Spalovací vzduch

Keywords

- Gasification boiler
- Efficiency
- ČSN 303-5
- Combustion air

Obsah

Seznam použitých značek, veličin a indexů	9
Seznam značek a veličin.....	9
Význam použitých indexů	11
1. Úvod	13
2. Obecné informace o firmě Viadrus a.s.	14
2.1 Vyráběné kotle:.....	14
3. Konkurence.....	16
3.1 Verner	16
3.2 ATMOS	16
3.3 Dakon.....	17
4. Podrobné informace o Hefaistos P1	18
4.1 Technické údaje kotle:	19
4.2 Regulátor ST 81	20
5. Palivo.....	21
5.1 Základní vlastnosti paliv	21
5.2 Vlastnosti biomasy:.....	21
6. Typy kotlů na pevná paliva podle použité technologie	25
6.1 Prohořivací kotle.....	25
6.2 Odhořivací kotle	26
6.3 Zplyňovací kotle	26
7. Zplyňování.....	28
7.1 Zapojení kotle	30
8. Emise na výstupu z kotle.....	32
8.1 Minimální účinnost kotle	32
8.2 Emise znečišťujících látek	33
8.3 Emise znečišťujících látek při dokonalém spalování.....	33

9.	Provedení zkoušky pro stanovení výkonu kotle	37
9.1	Měřené veličiny	37
9.2	Zkušební metody a doba trvání zkoušky	38
9.3	Stanovení tepelného výkonu a účinnosti kotle	38
9.4	Stanovení hodnot emisí	39
9.5	Výpočet	39
9.6	Účinnost kotle	39
10.	Infračervené fotky pláště	41
10.1	Vrchní dvířka	41
10.2	Spodní dvířka	41
10.3	Levá strana	42
10.4	Pravá strana	42
10.5	Zadní část	43
10.6	Kouřový nástavec	43
10.7	Vrch kotle	44
11.	Původní proudění spalovacího vzduchu	45
12.	Změna proudění spalovacího vzduchu	46
12.1	Přední část	47
12.2	Boky	47
12.3	Zadní díl	48
12.4	Trubice	48
12.5	Kouřový nástavec	49
13.	Měřicí zařízení	51
13.1	Měřicí stanice	51
13.2	Vodoměr	51
13.3	Manometr	52
13.4	Měření teploty	52

13.5	Vlhkost dřeva	53
13.6	Termografická kamera	53
13.7	Přístroj na měření rychlosti vzduchu.....	54
14.	Výpočty:	55
14.1	Stechiometrie spalování	55
14.2	Teoretické množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva	56
14.3	Teoretické množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva	56
14.4	Stechiometrický objem suchých spalín	56
14.5	Přebytek vzduchu	57
14.6	Spaliny:.....	57
14.7	Objem suchých spalín skutečně vzniklých.....	57
14.8	Výpočet jmenovitého tepelného výkonu.....	57
14.9	Tepelný příkon	58
15.	Výpočet poměrných tepelných ztrát	59
15.1	Účinnost kotle přímá metoda	59
15.2	Nepřímá metoda	59
16.	Sdílení tepla	64
16.1	Přenos tepla vedením	64
16.2	Přenos tepla prouděním (konvekci).....	65
16.3	Přenos tepla zářením (sáláním)	68
17.	Výpočty veličin spalování	69
17.1	Rozbor paliva:	69
17.2	Teoretické množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva	69
17.3	Teoretické množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva	69
17.4	Stechiometrický objem suchých spalín	69
17.5	Přebytek vzduchu	70
17.6	Spaliny:.....	70

17.7	Ostatní veličiny	71
17.8	Výpočet jmenovitého tepelného výkonu	71
17.9	Výpočet poměrných tepelných ztrát	72
17.10	Účinnost kotle nepřímou metodou	74
18.	Výpočet sdílení tepla	75
18.1	Konvekce	75
18.2	Sálání	86
18.3	Přenos tepla celkem	89
19.	Emise	90
19.1	Před úpravou	90
19.2	Parametry po úpravě	91
19.3	Emise po úpravě	92
20.	Porovnání	93
21.	Závěr	94
22.	Použitá literatura	96
23.	Seznam příloh	96

Seznam použitých značek, veličin a indexů

Seznam značek a veličin

Značka	Veličina	Rozměr
$(\text{CO}_2+\text{SO}_2)'$	Zjištěná objemová koncentrace oxidu uhličitého a siřičitého ve spalínách	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$
Re'_{kr}	Kritická hodnota Reynoldsova kritéria	
$S_{kanál}$	Povrch kanálu	m^2
ε_L	Opravný součinitel pro krátké trubky	
ε_R	Opravný součinitel pro oblouky	
ε_t	Opravný součinitel na neizotermické proudění	
C	Hmotnostní podíl uhlíku	$\text{kg}.\text{kg}^{-1}$
CO'	Zjištěná objemová koncentrace oxidu uhelnatého ve spalínách	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$
$\text{CO}_{2\text{max}}$	Maximální objemová koncentrace oxidu uhličitého	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$
C_{pmAtr}	Střední měrná tepelná kapacita spalín	$\text{J}.\text{(kg.K)}^{-1}$
$C_{\text{pmH}_2\text{O}}$	Střední měrná tepelná kapacita vodní páry	$\text{J}.\text{(m}^3.\text{K)}^{-1}$
D	Průměr potrubí	
d_h	Hydraulický průměr	m
F_x	Plošný obsah dílčí části povrchu	m^2
G	Gravitační zrychlení	$\text{m}.\text{s}^{-2}$
Gr	Grashofovo kritérium	
H	Hmotnostní podíl vodíku	$\text{kg}.\text{kg}^{-1}$
H_u	Výhřevnost paliva	$\text{J}.\text{kg}^{-1}$
H_w	Hydraulický odpor na straně vody	mbar
L	Charakteristický rozměr	m
L_{min}	Stechiometrický objem vzduchu	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
Nu	Nusseltovo kritérium	
O_2	Hmotnostní podíl kyslíku	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
O_{min}	Stechiometrický objem kyslíku	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
Pr	Prandtlovo kritérium	
Q	Tepelný výkon	W

Q	Tepelný tok	W.m^{-2}
$Q_{1,2}$	Přenos tepla mezi dvěma šedými povrchy s přímým ozářením	W
q_A	Poměrná ztráta citelným teplem spalín	
Q_B	Tepelný příkon	W
q_B	Pohotovostní ztráta	
q_C	Poměrná ztráta mechanickým nedopalem	
$Q_{\text{celk},k}$	Celkový přenos tepla konvekcí	W
$Q_{\text{celk},s}$	Celkový přenos tepla sáláním	W
Q_N	Jmenovitý tepelný výkon	W
q_S	Poměrná ztráta sdílením tepla do okolí	
q_U	Poměrná ztráta plynným nedopalem	
Q_v	Tepelná ztráta zkušebního zařízení	W
Q_{ved}	Přenos tepla vedením	W
Q_{xk}	Přenos tepla konvekcí	W
Q_{xs}	Přenos tepla sáláním	W
R	Poloměr zakřivení	
Re	Reynoldsovo kritérium	
S	Hmotnostní podíl síry	kg.kg^{-1}
$\text{SO}_{2\text{max}}$	Maximální objemová koncentrace oxidu siřičitého	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$
t_A	Teplota spalín	$^{\circ}\text{C}$
t_E	Teplota vstupní studené vody	$^{\circ}\text{C}$
t_L	Teplota okolního prostředí	$^{\circ}\text{C}$
t_m	Průměrná teplota vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
t_R	Vstupní teplota vody	$^{\circ}\text{C}$
t_V	Výstupní teplota vody	$^{\circ}\text{C}$
t_{WA}	Výstupní teplota chladicí vody	$^{\circ}\text{C}$
ν	Kinematická viskozita	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
V_A	Objem suchých spalín	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
V_{Atrmin}	Stechiometrický objem suchých spalín	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
V_{CO}	Stechiometrický objem oxidu uhelnatého	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
V_{CO_2}	Stechiometrický objem oxidu uhličitého	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$

V_N	Stechiometrický objem dusíku	$m^3.kg^{-1}$
V_{SO_2}	Stechiometrický objem oxidu siřičitého	$m^3.kg^{-1}$
V_W	Objem vodní páry	$m^3.kg^{-1}$
W	Obsah vody	
w_1	Průtok vody	$m.s^{-1}$
w_2	Hmotnostní průtok chladicí vody	$kg.s^{-1}$
α	Přebytek vzduchu	-
α	Součinitel přestupu tepla	
β	Průtok paliva	$kg.s^{-1}$
η_k	Účinnost kotle	
Ξ	Součinitel hydraulického odporu	
ρ	Hustota vody	$kg.m^{-3}$
E	Intenzita vyzařování	$W.m^{-2}$
γ	Koeficient objemové teplotní roztažnosti	$1.K^{-1}$
ε	Emisní součinitel	
σ	Stefan-Bolzmannova konstanta	$W.m^{-2}.K^{-4}$

Význam použitých indexů

B	Příkon
2	Počet molekul
A	Cítné teplo spalin
Atr,min	Stechiometrické spaliny
B	Pohotovostní
C	Uhlík
Celk,k	Celkem konvekce
Celk,s	Celkem sálání
CO	Oxid uhelnatý
CO2	Oxid uhličitý
E	Vstupní hodnota
G	Mechanický nedopal
K	Kotel

Kanál	kanál
L	Okolní prostředí
M	Průměr
Max	Maximální
Min	Stechiometrický
N	Jmenovitá hodnota
N ₂	Dusík
O ₂	Kyslík
pmAtr	Střední měrná hodnota spalin
pmH ₂ O	Střední měrná hodnota vody
S	Síra
SO ₂	Oxid siřičitý
U	Palivo
U	Plynný nedopal
V	Vstupní
V	Zkušební zařízení
Ved	Vedení
W	Voda
X	Dílčí hodnota
Xk	Dílčí konvekce
Xs	Dílčí sálání

1. Úvod

Diplomová práce se zabývá změnou proudění spalovacího vzduchu ve zplyňovacím kotli Hefaistos P1 od firmy Viadrus a.s. Kotel se konstrukčně upraví tak, aby proudící spalovací vzduch při nasátí do kotle, ochladil stěny násypky kotle a tím se zvýšila účinnost kotle a také zvýšila teplota spalovacího vzduchu. Čím vyšší teplota spalovacího vzduchu, tak tím jsou nižší sledované emise, hlavně oxidu uhelnatého a uhlovodíků. Norma ČSN 303-5 popisuje limitní emisní hodnoty pro tyto emise, popisuje je pomocí tzv. Emisních tříd. V práci bude počítána celková účinnost kotle pomocí normy ČSN EN 303-5 a výpočet přenosu tepla, mezi stěnami násypky a proudícím vzduchem.

V dalším kroku dojde k popsání jednotlivých nových a upravených komponent nutných pro tuto konstrukční změnu. Poté dojde k montáži jednotlivých dílů a provedení zkoušky dle ČSN 303-5.

Cíl práce

Zjistit vliv změny proudění spalovacího vzduchu, z původního proudění na nové proudění, na emise, účinnost a výkon. Spočítat účinnost kotle a změřit emise před úpravou a po ní.

2. Obecné informace o firmě Viadrus a.s.

Český výrobce litinových kotlů a radiátorů s tradicí od roku 1890. Výrobní závody nabízejí na tuzemský i světový trh široký sortiment výrobků. Výrobní program závodu Topenářská technika Viadrus tvoří litinové radiátory v klasickém provedení (Kalor) a v provedení s čelní panelovou plochou (Kalor 3) a historické radiátory Bohemia. Závod vyrábí i vytápěcí kotle ve výkonech od 5 kW až 750 kW na plynná, tekutá a pevná paliva, dále ohřívače teplé užitkové vody, topenářské i netopenářské komerční odlitky ze šedé litiny, litinové kotlové články a tělesa. Součástí závodu je i provoz slévárny oceli a neželezných kovů, zaměřený na zakázkové speciální odlitky pro hutní a strojírenský průmysl. Více než polovina vyrobených kotlů míří na zahraniční trhy.

Kotle se nejčastěji vyrábějí jako článkové, takže čím více článku tím větší výkon. Mezi přednosti patří vysoká kvalita litinového výměníku a široké spektrum kotlů.

2.1 Vyráběné kotle:

- Kotle na tuhá paliva
- Plynové kotle

Jelikož firma VIADRUS a.s vyrábí nespočetné množství kotlů, vyberu pouze ty nejzajímavější.

Litinový kotel Hercules U26

Asi nejrozšířenější a nejznámější kotel. Jde o klasický prohořivací kotel. Tím, že jde o nejstarší typ kotle, proto se od 1. 1. 2014 podle ČSN 303-5 již nemůže prodávat. Prodává se pouze U26 ECO, která má přidanou keramiku do spalovacího prostoru a tím splní přísnou normu.

Výkon: 12 ~ 72 kW (podle počtu článků)

Palivo: koks, černé uhlí, kusové dřevo

Od 1.1.2014. pouze palivo koks ve verzi U26 ECO



Obr. 2.1 Hercules U26

Kondenzační kotel NAOS K4

Je to novinka, která přišla na trh loňský rok. Tento kondenzační kotel získal na posledním několika výstavách v Praze, Ostravě, Košice... ocenění za design a za nejlepší kotel ve své třídě.

Výkon: 5 - 24 kW

Palivo: Zemní plyn, propan

Přednosti:

- jednoduchá obsluha
- normovaná účinnost až 105 %
- tichý chod
- široký rozsah modulace
- snadná montáž i servis



Obr. 2.2 Naos K4

Automatický kotel Vulcanus

Kotel Vulcanus je určen k automatickému vytápění tuhými palivy v automatickém režimu. Je ovládán modulačním automatickým regulátorem, který ovládá činnost kotle včetně ohřevu teplé vody. Konstrukce litinového výměníku vychází z kotle Hercules U26. Pro spalování je využíván retortový hořák umístěný v podstavci kotle. Palivo je do hořáku přiváděno šnekovým podavačem. Samozřejmostí je ochrana proti prohoření paliva i během výpadku elektrického proudu.

Výkon

6-35 kW

Palivo

černé uhlí, hnědé uhlí, dřevní pelety



Obr. 2.3 Vulcanus

3. Konkurence

V ČR působí na 15 výrobců topenářské techniky. Z těchto 15 mezi nejznámější firmy patří ATMOS, Verner, Viadrus, Dakon. Z každé výše uvedené firmy představím jeden kotel, který konkuruje kotli Hefaistos P1 E. Tyto zplyňovací kotle jsou označovány jako pyrolytické zplyňovací kotle.

3.1 Verner

Společnost Verner jako první přišla se zplyňovacím kotlem v roce 1991. Jako jediní vyrábí kotle s vnitřní stěnou z nerezové oceli.

Kotel Verner VN25D

Jde o pyrolytický zplyňovací kotel na kusové dřevo, brikety a dřevní odpad

- Výkon 25 kW
- Kotel je vyroben z nerezové oceli
- Splňuje Emisní třídu 4
- 7 let záruka na kotlové těleso
- Cena od 68 000 Kč



Obr. 3.1 Verner VN25D

3.2 ATMOS

Rodinná česká firma. Firma exportuje více než 80% své produkce do zahraničí. Zaměřují se hlavně na spalování dřeva a zplyňovací kotle.

ATMOS DC 32 S

Zplyňovací kotel na dřevo, těleso je svařeno z ocelových plechů 3-8 mm.

- Výkon 25-35 kW
- Účinnost 83-92 %
- Spalinový ventilátor
- Záruka 3 roky
- Emisní třída 4
- Cena od 37000 Kč



Obr. 3.2 Atmos DC 32S

3.3 Dakon

Dakon Pyro F 32 KP

Zplyňovací pyrolytický kotel pro spalování kusového dřeva

- Výkon 32 kW
- Kotel vyrobený z litiny
- Účinnost až 86 %
- Emisní třída 3
- Záruka na kotlové těleso 5 let
- Cena od 33 000 Kč



Obr. 3.3 Dakon Pyro F 32 FP

Kotle se tedy nejčastěji vyrábějí z kotlového plechu o tloušťce 5-7 mm (např. ATMOS), nebo odlévají z litiny (např. Viadrus), nebo z nerezové oceli o tloušťce 7 mm (Verner). Co se týče zplyňovacích kotlů, tak jsou si většinou podobné. Všechny mají spalínový ventilátor a elektronickou regulaci. Odlišné jsou např. v dodavateli elektronické regulace. Co se týče vnitřku kotle, tak násypka i spalovací komora mají podobný tvar, avšak každý si to vymyslel za sebe. A když tyto kotle srovnáme podle ceny, tak samozřejmě nejlevnější kotle jsou z kotlového plechu, poté litina a nerezový plech, nezáleží jenom na materiálu, ale také na cenové politice dané firmy.

4. Podrobné informace o Hefaistos P1

Kotel Hefaistos P1 je zplyňovací litinový článkový nízkotlaký kotel s plechovou násypkou, určený pro spalování kusového dřeva. Řízení kotle Hefaistos P1 T (termostatická varianta) je řešeno pomocí termostatů (provozní, spalínový a termostat čerpadla). Termostatická varianta se používá u 6-7 čl. provedení.

Řízení kotle Hefaistos P1E (elektronická varianta) je řešeno pomocí regulátoru ST 81. Elektronická varianta se používá u 3-5 čl. provedení. Ventilátor je vybaven halovou sondou pro snímání otáček.



Obr. 4.1 Hefaistos P1E

Použití:

Tříčlánková velikost kotle Hefaistos P1E je vhodná pro vytápění rodinných domků. Kotel je vyráběn jako teplovodní s nuceným oběhem topné vody a pracovním přetlakem do 400 kPa (4 bar). Před expedicí je odzkoušen na těsnost zkušebním přetlakem 800 kPa (8 bar). Kotel je určený pro vytápění v uzavřených i otevřených otopných systémech.

Kotel musí být projektován s jednou s těchto variant připojení:

- akumulční nádoba
- třicestný ventil
- čtyřcestný ventil

Přednosti kotle

1. vysoká životnost litinového výměníku a všech ostatních dílů vzhledem ke kvalitě použitých materiálů
2. Propracovaná výrobní technologie na automatických formovacích linkách se stálou a ověřenou kvalitou výrobního procesu (ISO 9001, ISO 14 001).
3. Účinnost spalování 83-89 %.
4. Jednoduchá obsluha a údržba
5. Odstupňování výkonu dle počtu článku, od 30 kW až do 100 kW
6. Ekologický provoz. Splňuje požadavky pro udělení ochranné známky EŠV (Ekologicky šetrný výrobek)

4.1 Technické údaje kotle:

Počet článků	3	Jednotky
Jmenovitý tepelný výkon	30	kW
Spotřeba paliva při jmenovitém tepelném výkonu	8	kg.h ⁻¹
Objem násypky	99	l
Doba hoření při jmenovitém výkonu	3	hod
Teplota spalin na výstupu	140-200	°C
Hmotnostní průtok spalin při jmenovitém tepelném výkonu	16,33	g.sec ⁻¹
Účinnost	83-89	%
Třída kotle dle EN 303-5	3	-
Obsah vody	52,9	L
Hmotnost	584	kg
Hloubka spalovací komory	354	mm
Průměr kouřového hrdla	160	mm
Rozměry kotle: - výška x šířka	1541x833	mm
- Hloubka	1167	mm
Rozměry plnicího otvoru	507x256	mm
Maximální provozní přetlak vody	400	kPa
Minimální provozní přetlak vody	50	kPa
Zkušební přetlak vody	800	kPa
Hydraulická ztráta kotle	Viz obr	-
Minimální teplota vstupní vody	60	°C
Rozsah regulace teploty vody	60-85	°C
Hladina hluku	Nepřesahuje 65 dB	dB
Požadovaný tah	0,25-0,35	mbar
Teplota chladicí vody pro zařízení pro odvádění přebytečného tepla	5-20	°C
El. Příkon	180	W

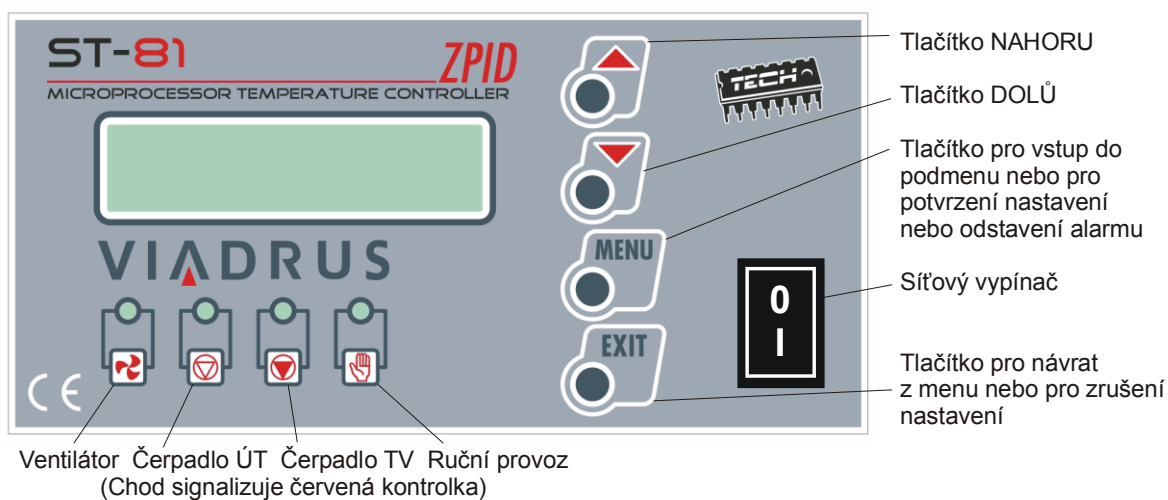
Tab. 4.1 Parametry kotle Hefaistos PIE

4.2 Regulátor ST 81

Regulátor teploty ST-81 je určen pro kotle ústředního vytápění. Ovládá oběhové čerpadlo UT (ústřední topení), čerpadlo TV (teplá voda) a také výkon odtahového ventilátoru. Regulátor je vybaven programem zPID.

PID znamená regulátor skládající se z regulátor skládající se proporcionálního členu P se zesílením k_p , integračního členu I s časem zdvojení T_i a také diferenčního členu D s časem předstihu T_d . Jeho úkolem je udržování výstupní hodnoty teploty vody z kotle na stanovené úrovni. Ovládání tohoto typu spočívá v kontrole teploty spalin, tj. udržuje teplotu spalin na nastavené hodnotě a také udržuje stálou teplotu vody v kotli. Tento regulátor je kromě klasických čidel vybaven také čidlem spalin. Regulátor měří neustále teplotu spalin, a pokud se stane, že teplota překročí nastavenou mez, tak regulátor zpomalí nebo vypne ventilátor.

Použitím tohoto typu regulátoru ušetříme až 13% paliva, teplota výstupní vody je na velmi stabilní úrovni, což má vliv na delší životnost výměníku kotle. Kontrola teploty spalin zaručuje nižší emise prachu a plynů škodlivých pro životní prostředí.



Obr. 4.2 Ovládání ST-81

5. Palivo

Palivo je všeobecné označení pro chemický prvek, chemickou látku nebo jejich směs. Tato směs má schopnost za vhodných podmínek začít a poté udržet chemickou reakci spalování. Během spalování se uvolňuje chemická energie obsažená v palivu, a dochází k přeměně hlavně na tepelnou energii, tuto energii dále využíváme. Obecně paliva mohou obsahovat hořlavinu a balast (voda, popelovina, inertní plyny).

Požadavek na palivo:

- Vytvořit se vzduchem zápalnou směs, která shoří a zanechá co nejméně mechanicky nebo chemicky škodlivých látek
- Maximální obsah aktivních látek, které uvolňují teplo
- Minimální obsah pasivních látek nebo látek, které spalování stěžují

5.1 Základní vlastnosti paliv

Ve spalovacích procesech dělíme paliva na:

- Tuhá
- Kapalná
- Plynná

Jelikož kotel, ve kterém spalují je na tuhá paliva, tak se budu zabývat pouze tuhými palivy

Tuhá paliva

Nejrozšířenějším tuhým palivem je uhlí (černé, hnědé), dále zde patří biomasa, rašelina, koks, brikety atd.

Kotel Hefaistos P1 E je vhodný především pro spalování dřeva

5.2 Vlastnosti biomasy:

- Výhřevnost
- Vlhkost
- Obsah popela
- Teplota deformace popela, teplota měknutí, tání a tečení
- Mechanická odolnost
- Sypká hmotnost

Výhřevnost

Při oxidačních procesech při hoření paliva se uvolňuje teplo, které se u tuhého paliva vztahuje k jeho hmotnosti a vyjadřuje se v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ nebo $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (za teploty 0°C a tlaku 0,1 MPa. Uvolněné teplo se vyjadřuje jako spalné teplo nebo výhřevnost paliva.

Spalné teplo je definováno jako množství tepla, které se uvolní při dokonalém spálení paliva (1 kg nebo 1 m^3), při ochlazení spalin až na původní teplotu paliva (0°C), přičemž veškerá pára ve spalinách úplně zkondenzovala.

Výhřevnost paliva je definována jako množství tepla uvolněného z paliva, přičemž vlhkost paliva zůstane ve spalinách spolu s tepelnou energií, použitou na přeměnu vody na vodní páru. Tímto je výhřevnost nižší než spalné teplo, a to o energii potřebnou k ohřevu vody. Tato tepelná ztráta je přibližně 2500 kJ na 1kg vody obsažené v palivu.

Přepočet mezi jednotlivými teple vyjadřuje vzorec:

$$Q_i = Q_n - 2453 \cdot (W + 9 \cdot H_2) \quad [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.1)$$

Spalné teplo u různých plodin a paliv

Plodina (100% sušina)	MJ/kg	Dřevní štěpka dle vlhkosti	MJ/kg
Konopí seté	18,1	Vlhkost 60%	9,20
Len-sláma	18,5	Vlhkost 40%	10,10
Řepka ozimá	18,1	Vlhkost 30%	12,20
Topol štěpka	19	Vlhkost 20%	14,30
Vrba štěpka	18,5	Fosilní paliva	
		Hnědé uhlí	14,5-16,5
		Černé uhlí	26

Tab. 5.1 Výhřevnost biomasy

Vlhkost

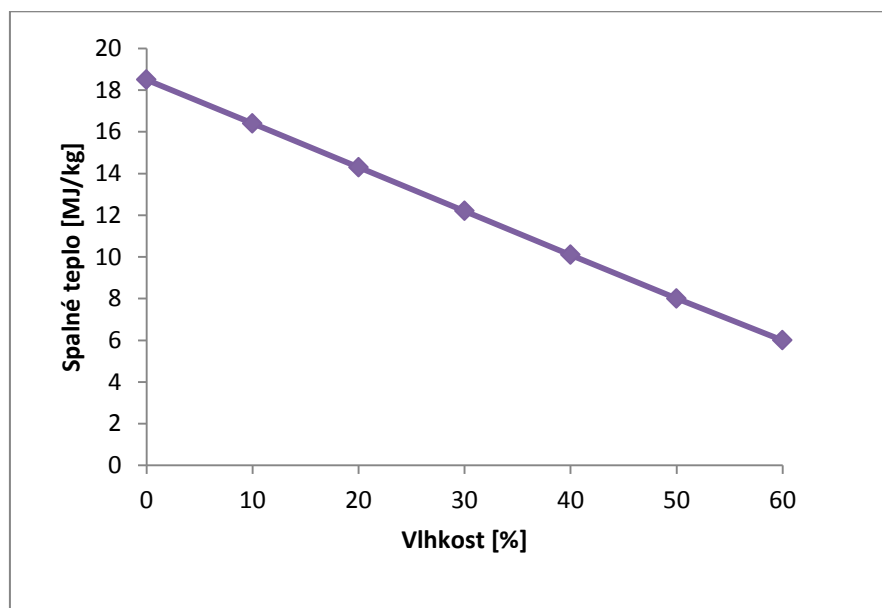
Další důležitou vlastností je jeho vlhkost. Ta má bezprostřední vliv na jeho výhřevnost. Biomasa bez vody se v přírodě nevyskytuje, čerstvé dřevo má asi vlhkost 50%, po dvou letech cca 20%. Obsah vody v biomase ovlivňuje i přítomnost hub (Parenchymu), tyto houby se podílejí na procesech samovznícení biomasy.

Spalování čerstvého dřeva z čerstvě pokácených stromů není optimální, protože výhřevnost z takového dřeva nepostačuje ani pro udržení spalovacího procesu. Pokud to vezmeme z druhé stránky tak, při spalování absolutně suchého dřeva, může docházet k výbušnému

hoření a velká část energie unikne v kouřových plynech. Ideální relativní vlhkost dřeva pro spalování je okolo 10-20 %.

Vlhkost	Dřevo	Kůra
%	MJ/kg	MJ/kg
0	18,5	18,8
10	16,4	16,7
20	14,3	14,6
30	12,2	12,5
40	10,1	10,5
50	8,0	8,4
60	6,0	6,3

Tab. 5.2 Závislost výhřevnosti na palivu a vlhkosti



Obr. 5.1 Závislost výhřevnosti na palivu a vlhkosti

Obsah popela

Obecně platí, že obsah popela ve dřevě se pohybuje okolo 0,5-1,5 %, oproti jiným pevným palivům, např. hnědé uhlí má kolem 20%, je obsah popele výrazně nižší. Popel po spálení dříví obsahuje množství živin, a tudíž se může používat jako hnojivo.

Teplota deformace popela, teplota měknutí, tání a tečení

Při termických procesech přeměny energie dochází v žárovém lůžku k fyzikálním změnám popela. V závislosti na teplotě dochází k deformaci až k úplnému roztavení částic popela. U paliv s nízkými teplotami měknutí popela, mezi které patří stébelniny, a celé rostliny obilovin existuje velké riziko, že překročení kritické teploty povede ke vzniku usazenin v topeništi na roštu a na stěnách výměníku. Tyto usazení pak můžou způsobit poruchy, přerušení provozu atd.

Druh paliva	Deformace	Měknutí	Tavení	Tečení
	°C			
Ječná sláma	659	783	923	1118
Pšeničné zrno	612	727	777	792
Smrkové dřevo	1041	1180	1265	1310
Hnědé uhlí	1260	1280	1360	1500

Tab. 5.3 Teplota deformace, měknutí, tavení a tečení u biomasy

Další vlastností je podíl uvolňovaných těkavých látek (tzv. dřevoplyn) a pevného uhlíku (zbytek po extrakci popela a těkavých látek). Obecně platí, že čím mladší dřevo tím více těkavých látek. Vysoký obsah těchto látek je tedy typický pro dřevo, pohybuje se v rozmezí 75-85 %. Tento vysoký podíl těkavých látek, způsobuje jev typický pro hoření dřeva tzv. „dlouhý plamen“. Ten je způsoben těmito látkami, které hoří ve vzhledu mezi roštem a komínem. [8]

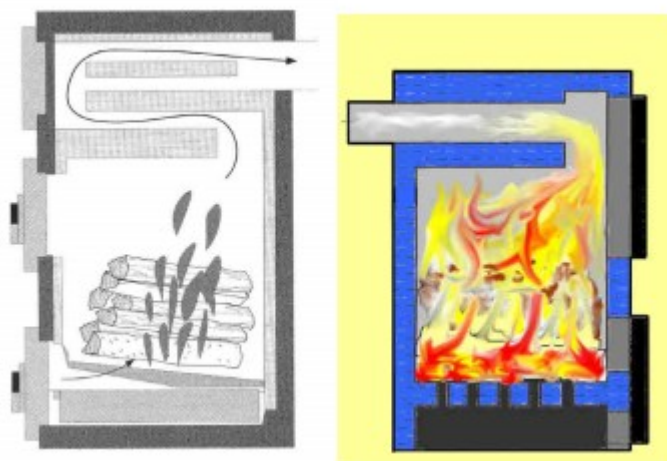
6. Typy kotlů na pevná paliva podle použité technologie

Nejběžnější technologií, která je vyžívaná v kotlích pro domácnosti jsou odhořivací, prohořivací nebo zplyňovací systémy. Palivo se do takovýchto kotlů přidává manuálně a jedná se převážně o uhlí, koks nebo kusové palivo – polena, štípané dřevo.

6.1 Prohořivací kotle

Prohořivací kotle jsou kotle jednoduché a levné. Ale většinou mají problém dosáhnout vyšších emisních tříd.

Tyto kotle jsou běžně vybaveny přívodem primárního vzduchu, který je veden skrz rošt a skrz celou dávku paliva. Spalování probíhá v celé dávce paliva více či méně ve stejnou dobu. Sekundární vzduch je přiváděn nad dávku paliva, kde probíhá druhé spalování. Palivo je dávkováno přes horní dveře a popel je odstraňován přes spodní dvířka. Kotel většinou využívá přirozeného tahu komína.



Obr. 6.1 Prohořivací kotel

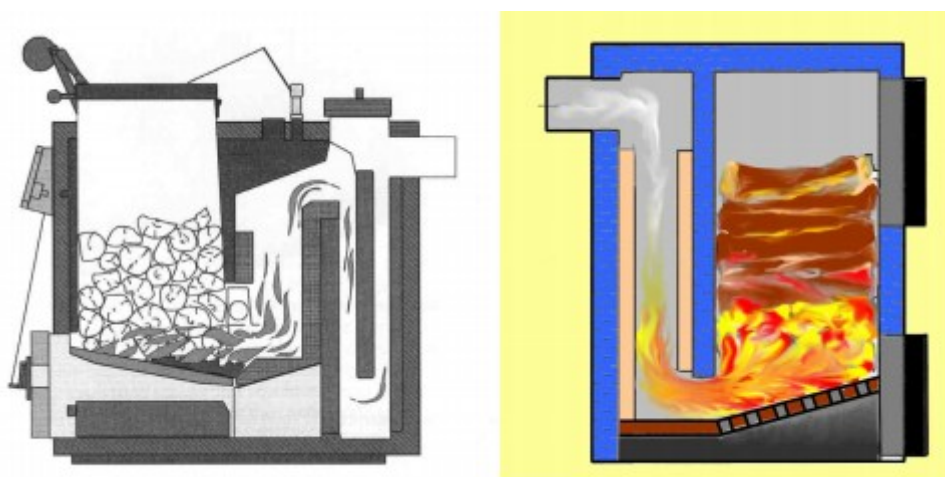
Nevýhodou tohoto systému je to, že v případě příliš vysoké dávky paliva není možné prostorově oddělit zplyňování a oxidaci, důsledkem toho je nízká účinnost a vysoké emise. Emise nespálených uhlovodíků a CO mohou být vyšší a to v případě, že prohořivací kotel pracuje s nízkou rychlostí spalování. Nejlepší palivo pro tyto kotle je koks. S ohledem na jeho vysokou cenu je v kotli spalováno hnědé uhlí, což je naprosto nevhodné užití stejně tak jako spalování mokrého dřeva. Účinnost prohořivacích kotlů je od 50 až 70%. Díky tomuto způsobu hoření, nejsou tyto kotle schopny spalovat do dnešních emisních tříd. Takže časem dojde k ukončení výroby.

6.2 Odhořívací kotle

U odhořívacích kotlů jsou plamen a spaliny vedeny dospod (spodní tah) nebo do boku (boční tah) topeniště, v tomto případě je zahřívána pouze menší část paliva. Zplyňování a konečné spalování probíhá v oddělených komorách, které zajišťují více stabilní spalování. Popel propadá skrz rošt do popelníku.

Odhořívací kotle buď využívají přirozeného tahu komína nebo jsou vybaveny spalínovým ventilátorem.. Spalování v odhořívacích kotlích představuje stabilnější proces než u prohořívacích kotlů, a proto také produkují méně emisí ve srovnání s prohořívacím způsobem. Účinnost odhořívacího kotle se pohybuje okolo 70 až 80%.

Princip typického odhořívacího kotle je znázorněn na Obr. 6.2.



Obr. 6.2 Kotel se spodním odhoříváním

6.3 Zplyňovací kotle

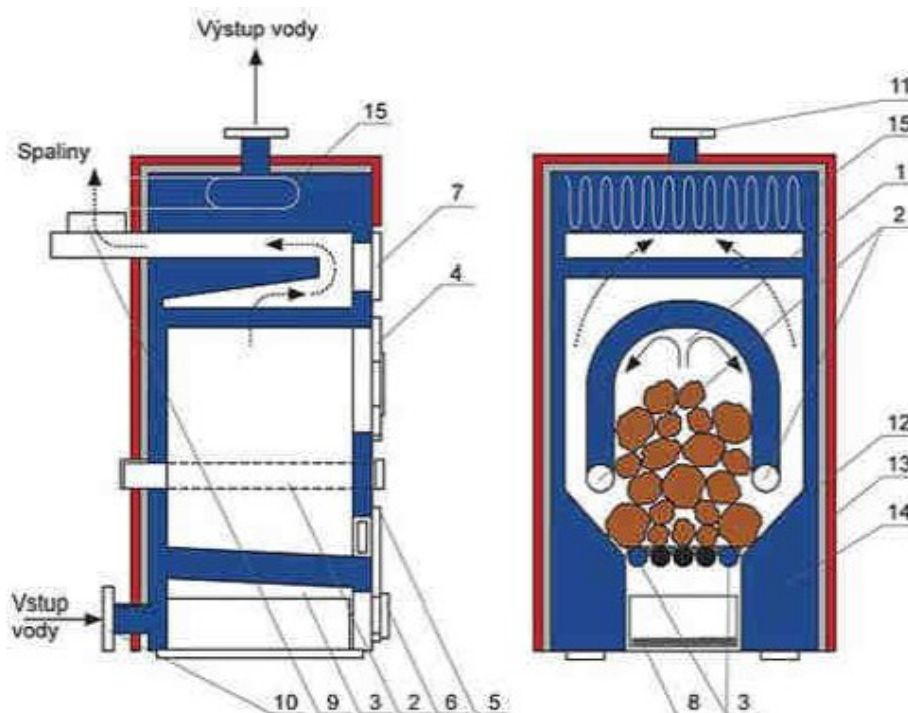
Další možnou technologií je zplyňování. Zplyňovací kotle patří mezi kotle s nejvyšší účinností. Účinnost zplyňovacích kotlů se pohybuje kolem 70 - 90%. Výhodou těchto kotlů díky vysoké účinnosti je úspora paliv a provozních nákladů a také menší produkce znečišťujících látek.

Při zplyňování dochází k tepelnému rozkladu pevného uhlíku obsaženého v palivu v jiné části spalovacího zařízení než kde dochází k vlastnímu spalování vzniklého plynu. Obr. 30 znázorňuje zjednodušený řez zplyňovacím kotlem na kusové dřevo. Do horní komory, která je zároveň i zásobníkem paliva je přiváděn vzduch jehož množství je podstechiometrické. Zde hoří především uhlík na CO (typický produkt nedokonalého spalování). Přitom dochází k uvolnění dalších hořlavých plynů z termického rozpadu

dřeva. Vzniklé spaliny a plyn jsou vedeny do spalovací komory (trysky), kde je přiveden další vzduch (sekundární), kde shoří vzniklé CO a další hořlavé plyny. Vzniklými horkými spalinami se ohřívá voda. Výhodou zplyňování je vysoká účinnost využití energie v palivu a nižší škodlivé emise oproti klasickému spalování, jelikož plynné palivo se spaluje snáze než palivo pevné. [5]

7. Zplyňování

Při zplyňování dochází k rozkladu organických a anorganických látek v uzavřené komoře kotle. Proces zplyňování probíhá v zásobníku (násypce) kotle na keramickou tryskou. Proces zplyňování můžeme rozdělit na 3 fáze. V první fázi dochází k vysoušení prachavých složek z paliva. Ve druhé fázi se tyto uvolněné plyny mísí s přehřátým sekundárním vzduchem a vytvoří hořící směs plynů. V poslední třetí fázi, dochází ke shoření plynů ve spalovacím prostoru kotle, spaliny poté procházejí výměníkem, kterým ohřívají vodu a jsou odvedeny do komína. Tento způsob hoření je vysoce účinný. Díky turbulentnímu proudění spalin ve výměníku tepla dochází k vysoké účinnosti přenosu tepla. Díky účinnému spalování a vysokému přenosu tepla, dosahuje účinnost zplyňovacího kotle kolem 90%. Výkon kotle je plynule regulovatelný od 40 do 100%. Regulaci zajišťuje elektronický regulátor. Hefaistos P1 má regulátor od firmy Tech. Regulátor se řídí provozní teplotou kotle a potřebné teploty ve vytápěných prostorech. Další důležitou věcí u zplyňovacích kotlů je odtahový ventilátor, ten plní v kotli dvě důležité funkce. Zajišťuje plynulý odvod spalin z kotle, a nasává spalovací vzduch do kotle. Další výhodou tohoto kotle je že dokáže spalovat větší polena dřeva, které mohou mít vlhkost až 20%.



Obr. 7.1 Schéma zplyňovacího kotle

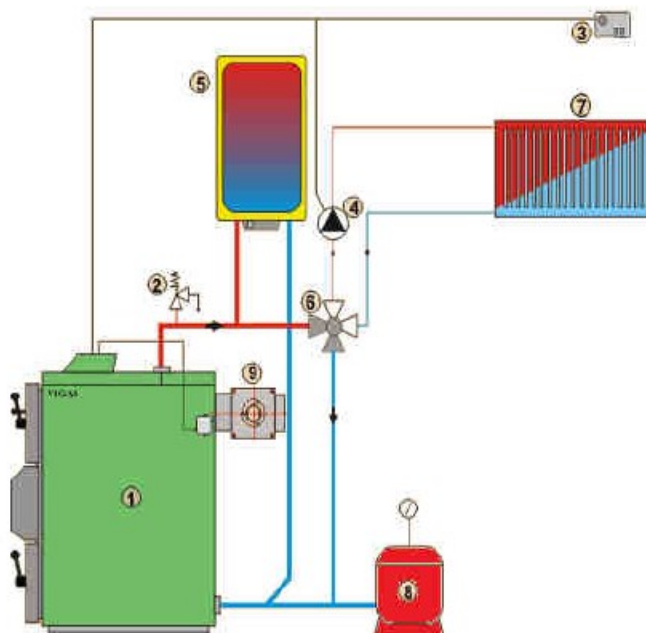
Zplyňovací kotel nakusové dřevo

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1. spalovací komora | 10. přívod vratné vody do kotle |
| 2. přívod sekundárního vzduchu | 11. vývod topné vody z kotle |
| 3. vodou chlazený rošt | 12. Tepelná izolace kotle |
| 4. přiložené dvířka | 13. oplechování kotle |
| 5. čistící dvířka | 14. modrá barva označuje vodu v kotli |
| 6. dvířka pro přívod a regulaci primárního vzduchu | 15. Dochlazovací smyčka |
| 7. dvířka pro čištění kotle | |
| 8. popelník | |
| 9. vývod spalin do komína | |

7.1 Zapojení kotle

Výrobci kotlů doporučují optimální využití instalovaného výkonu. Např. kotel Hefaistos 3.článkový má jmenovitý výkon 30 kW, což je na rodinný dům hodně, pokud kotel jede na nižší výkon než jmenovitý, tak se zvyšuje množství škodlivin a snižuje účinnost kotle. Nejefektivnější zapojení je s akumulacním zásobníkem. V akumulacním zásobníku se ukládá přebytečné teplo a pokud je akumulacní zásobník nahřátý, tak kotel se odstaví. Spotřeba dřeva ve zplyňovacím kotli se pohybuje od 4 kg/h až po 20 kg/h v závislosti na výkonu kotle, u 30 kW kotle se pohybuje spotřeba paliva okolo 8,5 kg/h.

Připojení kotle do vytápění soustavy



Obr. 7.2 Připojení kotle do soustavy

Zplyňovací kotel se nejčastěji umísťuje do suterénu domu. Sklad paliva by měl být co nejbližší kotli, ale zase ne méně než 400 mm od kotle. Soustava může být doplněna o akumulacní nádrž. Kotel lze připojit klasickým termoregulačním ventilem, nebo trojcestným (čtyřcestným) ventilem. Znárodnění připojení kotle viz obrázek

Schéma zapojení zplyňovacího kotle Obr.7.2

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| 1. Kotel | 6. Čtyřcestný ventil |
| 2. Pojistný ventil | 7. Vytápěcí soustava |
| 3. Pokojový termost | 8. Expanzní nádoba |
| 4. Oběhové čerpadlo | 9. Odtahový ventil |
| 5. Zásobník telé vody | |

Zplyňování je proces, kdy vznikají hořlavé plyny jako je vodík, oxid uhličitý, metan a některé nehořlavé produkty jako je oxid uhličitý a voda. Zplyňování probíhá v kotli s omezeným přístupem vzduchu. Podstechiometrickém množství kyslíku způsobuje nedokonalé hoření. Při hoření uhlovodíků se kyslík sloučí s uhlíkem, tím vznikne oxid uhličitý a voda. , ale vodík se neslučuje pouze s kyslíkem, uvolňuje se také jako čistý plyn. Uvolňuje se také uhlík. Díky omezenému kyslíku vzniká oxid uhelnatý. Plyny, které v tomto procesu vznikají se využívají jako palivo.

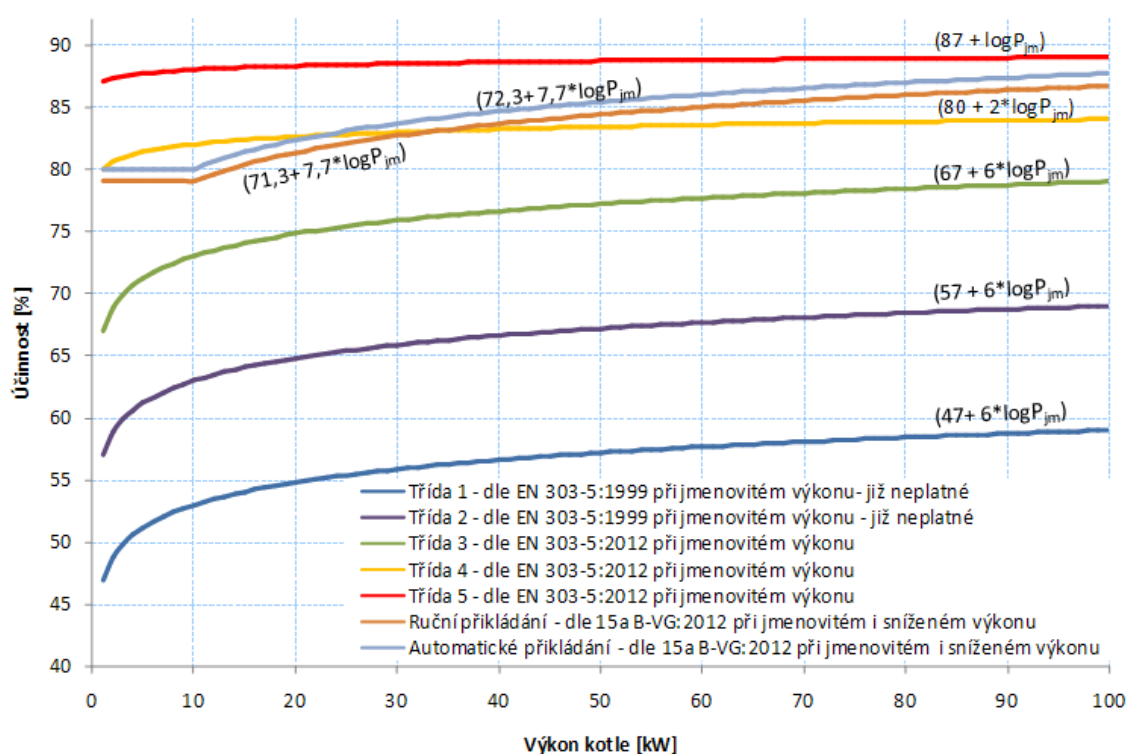
Složení plynu, který vzniká při zplyňování:

- Vodík 20%
- Oxid uhelnatý 18-20%
- Metan 2-3%
- Oxid uhličitý 8-10%
- Dusík 47-54% [5]

8. Emise na výstupu z kotle

8.1 Minimální účinnost kotle

Minimální účinnost je definována normou v závislosti na jmenovitém výkoně a třídě kotle. Vycházíme z normy ČSN 303-5:2012. Na obrázku vidíme již zrušené emisní třídy 1,2, dále aktuální platné emisní třídy 3,4,5. Tyto normy jsou platné v České Republice. Dále zde vidíme dvě rakouské normy, Jedna platí pro automatické kotle a druhá pro ručně přikládání kotle. U automatických kotlů jsou přísnější požadavky na účinnost.



Obr. 8.1 Graf emisních limitů

V Rakousku musí spalovací zařízení splnit účinnost při jmenovitém výkonu, ale také při sníženém výkonu, což už často způsobuje problémy, protože při nižším výkonu se také snižuje účinnost a zvyšují emise CO, OGC a prachu. U automatických kotlů je to 30% ze jmenovitého výkonu a u kotlů s ručním přikládáním jde o 50% jmenovitého výkonu.

V ČR se u kotlů s ručním přikládáním řeší pouze jmenovitý výkon a u automatických kotlů i při sníženém výkonu a to 30% ze jmenovitého výkonu.

Do 31. 12. 2013 se mohli prodávat kotle s platným certifikátem pro emisní třídu 1,2. OD 1. 1. 2014 už všechny nové kotle musí splňovat emisní třídu 3, což není pro

výrobce problém. Od 1. 1. 2018 dojde k dalšímu zpřísnění, kotle se mohou prodávat pouze pokud splňují 4 emisní třídu. Čtvrtá emisní třída a pátá třída je už výrazně přísnější než třetí, což může pro některé výrobce znamenat problém

V Německu jsou asi nejprísnejší limity v Evropě. Od 31.12.2014 bude platit BImSchV což znamená max. 400 mg/m³ CO a později má nastoupit BAFA a ta má limit 250 mg/m³.

[1]

8.2 Emise znečišťujících látek

Emise ze spalování paliv se mohou rozdělit do dvou skupin:

- Emise z dokonalého spalování
- Emise z nedokonalého spalování

8.3 Emise znečišťujících látek při dokonalém spalování

Oxid uhličitý

CO₂ je hlavním produktem spalování paliv u biomasy. Vytváří se z uhlíku, který je obsažen v palivu. Ale u biomasy považujeme emise CO₂ za neutrální, protože při spalování dochází k uvolnění CO₂, které biomasa naakumulovala při růstu. Z tohoto důvodu je spalování biomasy považováno za hlavní přínos životnímu prostředí.

Oxidy dusíku

Emise NO_x jsou důsledkem úplné oxidace palivového dusíku. Oxidy dusíku vznikají při hoření těkavých složek a při spalování pevného uhlíku. Hlavním produktem je oxid dusnatý NO, který se mění v atmosféře na oxid dusičitý NO₂.

Dělení oxidů dusíku:

- Palivové NO_x
- Termické NO_x
- Promptní NO_x

Oxid dusný

Emise N₂O jsou výsledkem úplné oxidace dusíku obsaženého v palivu. Úroveň emisí N₂O je velice nízká. I přes svou nízkou mírou emisí má vliv na globální oteplování.

Oxidy síry

Oxidy síry jsou výsledkem úplné oxidace síry obsažené v palivu. Z 95% se jedná o tvorbu oxidu siřičitého SO₂ a při nižších teplotách SO₃ (5%). Oxidy síry jsou nebezpečné

v tom, že když podkročíme rosný bod spalin, vzniká nebezpečná kyselina sírová H_2SO_4 , která má za následek korozi komínů.

Chlorovodík

Část chlóru obsaženého v palivu se uvolní ve formě HCl. Obsah chlóru ve dřevě je velice nízký. Významné množství se tvoří při spalování rostlinné biomasy např. tráva, sláma.

Obsah dusíku, síry a chlóru v palivech (sušině) můžeme vidět v tabulce.

Druh paliva	Dusík mg/kg	Síra mg/kg	Chlor mg/kg
Dřevní štěpka (smrk)	900-1700	70-1000	50-60
Sláma	3000-5000	500-1100	1000-7000
Seno	10000-24000	2000-6000	2500-20000
Tráva	4000-36000	800-7000	2600-20000

Tab. 8.1 Obsah škodlivin v palivu

Prach

Emise prachu vznikají z různých zdrojů. Patří zde např. polétavý popílek, který se skládá z hrubého polétavého popílku a aerosolu. Hlavní složkou aerosolů jsou těkavé kovy, které mají poměrně nízkou teplotu tání. Tím mohou způsobit usazeniny na kotli a zvýšit riziko koroze kotle.

Těžké kovy

Všechna paliva z biomasy obsahují těžké kovy. Nejvýznamnější je Měď, Olovo, Rtuť. Těžké kovy zůstávají v popelu nebo se odpařují.

Emise znečišťujících látek při nedokonalém spalování

Tyto emise jsou způsobené především:

- Nedostatečným směřováním spalovacího vzduchu a paliva ve spalovací komoře
- Celkový nedostatek kyslíku při spalování
- Příliš nízká teplota spalování
- Příliš krátká doba zdržení spalin při spalování

Oxid uhelnatý

Přeměna palivového uhlíku na CO_2 probíhá v několika krocích. Oxid uhelnatý je jeden z hlavních a nejnebezpečnějších meziproduktů. CO lze považovat za dobrý ukazatel kvality spalování. Spalovací zařízení o výkonech větších než 50 kW má lepší možnosti pro optimalizaci spalovacího procesu, než zařízení malých výkonů. Proto větší zařízení mají většinou nižší CO. Právě Emise CO patří mezi nejsledovanější škodlivé emise, které vidíme v tabulce 8.2.

Od 1. 1. 2014 platí v České Republice, že prodávané kotle musí splňovat min. Emisní Třidu 3 a výše, což znamená že produkce CO nesmí překročit 5000 mg/m_3 (při 10% O_2). Čtvrtá třída nabyde platnosti v roce 2018 a produkce CO nesmí překročit 1200 mg/m_3 (při 10% O_2). Pátá třída má mezní hodnotu 700 mg/m_3 (při 10% O_2).

Dávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon kW	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach ^{b)}		
			mg/m ³ _N při 10 % O ₂ ^{a)}								
			třída 3	třída 4	třída 5	třída 3	třída 4	třída 5	třída 3	třída 4	třída 5
ruční	biogenní	0–50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		50–150	2 500			100			150		
		150–500	1 200			100			150		
	fosilní	0–50	5 000			150			125		
		50–150	2 500			100			125		
		150–500	1 200			100			125		
samočinná	biogenní	0–50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		50–150	2 500			80			150		
		150–500	1 200			80			150		
	fosilní	0–50	3 000			100			125		
		50–150	2 500			80			125		
		150–500	1 200			80			125		

Tab. 8.2 Mezní hodnoty emisí

Metan

Ve spalovacích zařízeních na biomasu působí jako meziprodukt při konverzi palivového uhlíku a CO_2 a vodíku na H_2O . Příčinou vzniku metanu jsou příliš nízké teploty. Obecně všechny uhlovodíky představují sloučeniny, které vznikají dříve než CO, což je důvod pro jejich nižší emise.

Těžké organické látky (TOC nebo OGC)

Do této skupiny patří všechny uhlovodíky kromě metanu a těžkých uhlovodíků. Všechno tyto látky jsou meziproduktem konverze uhlíku na CO_2 a vodíku na H_2O . Úroveň

emisí je na stejné úrovni jako u metanu. V emisních třídách jsou také zahrnuty emise OGC. Od 1. 1. 2014 platí emisní limit $100-150 \text{ mg/m}^3$ (při 10% O_2) v závislosti na výkonu kotle. Od roku 2018 platí limit 50 mg/m^3 (při 10% O_2). A od roku 2022 30 mg/m^3 (při 10% O_2).

Prachové částice

Mezi prachové částice patří saze, popílek a dehet. Saze obsahují nespálený uhlík. Popílek je často unášen spaliny, díky jeho malé hustotě. Jako opatření pro snížení popílku můžeme použít odlučovače. U malých spalovacích zařízení je nejvýznamnější dehet. Emisní koncentrace závisí na teplotě. Takže čím nižší teplota tím více dehtu.

[5]

9. Provedení zkoušky pro stanovení výkonu kotle

Pro stanovení tepelného výkonu, účinnosti kotle, doby hoření, složení spalin, teploty spalin, tahu a vlastností emisí se kotel v průběhu zkoušek provozuje v rozsahu tepelného výkonu. Při jmenovitém tepelném výkonu se kotel musí provozovat tak, aby byl možný trvalý provoz. Minimální tepelný výkon kotlů musí být regulován samočinně řídicím přístrojem bez ručního zásahu. Před zahájením jakýchkoliv měření se musí dosáhnout provozní teploty kotle. V průběhu zkoušek musí být kotel provozován v souladu s provozními pokyny výrobce. Teplota okolního prostředí se musí pohybovat mezi 15 až 30 °C. Tah se nastaví podle pokynů výrobce na minimální tah.

V průběhu doby zkoušení se průměrná hodnota tahu nesmí lišit od hodnoty stanovené výrobcem o více než $\pm 3,0$ Pa

V průběhu doby zkoušky není přípustný ruční zásah ve formě prohrabování ohně, roštování ani jakákoliv úprava vrstvy paliva

9.1 Měřené veličiny

Dále uvedené měření se zjišťují při jednom měření a zaznamenávají se v protokolu o zkoušce typu:

- Obsah vody v palivu
- Výhřevnost paliva
- Doplněná hmotnost paliva
- Doba hoření při ruční dodávce paliva
- Teploty povrchu (při jmenovitém tepelném výkonu v typickém provozním stavu)
- Teplený výkon
- Teplota výstupní vody
- Teplota vstupní vody
- Teplota vstupní studené vody podle EN 304
- Teplota okolního prostředí
- Teplota spalin
- Tah
- Objemová koncentrace kyslíku (O_2) nebo oxidu uhličitého (CO_2)
- Objemová koncentrace oxidu uhelnatého (CO)
- Organické plynné látky THC (celkový uhlovodík)
- Koncentrace prachu (přerušované měření)

- Spotřeba pomocné energie

Všechny měřené veličiny, které se stanují průběžně, se zjišťují v maximálních intervalech 20s a zaznamenávají se se jako průměrné hodnoty v maximálních intervalech 1 minuty.

9.2 Zkušební metody a doba trvání zkoušky

Kotle pro ústřední vytápění s ruční dodávkou paliva

Před zahájením zkoušky se kotel uvede do ustáleného provozního stavu. Doba trvání této počáteční doby musí být minimálně 2 hodiny. A to proto, aby se v kotli vytvořila dostatečná žhavá vrstva. Poté může začít zkouška. Zkouška začíná bezprostředně po naplnění násypky kotle do plna až do okamžiku doplnění následné dávky paliva. Zkouška se skládá ze dvou následujících dob hoření. Každá musí mít 2 hodiny.

Kotle pro ústřední vytápění s automatickou dodávkou paliva

Zde je to podobné, ale zde nejsou dvě doby, ale jenom jedna, která trvá 6 hodin

9.3 Stanovení tepelného výkonu a účinnosti kotle

Metoda měření tepelného výkonu

Obecně

Měří se množství využitelného tepla předaného teplotonosné látce (vodě). Může být stanoveno přímo v okruhu kotle nebo přímo prostřednictvím výměníku tepla

Stanovení tepelného výkonu v okruhu kotle

Využitelný tepelný výkon předaný vodě se stanovuje buď měřením hmotnostního průtoku vody vstupující do okruhu kotle a zvýšení této teploty na výstupní hodnotu, nebo měření průtoku vody cirkulující v okruhu kotle a zvýšení její teploty.

Stanovení jmenovitého tepelného výkonu

Teplený výkon stanovený výrobcem se ověřuje při zkouškách s tolerancí $\pm 8\%$. Výrobcem daný tepelný výkon musí být dosažen, alespoň v jedné ze dvou dob zkoušky. V průběhu zkoušek při jmenovitém tepelném výkonu musí být průměrná hodnota teploty výstupní vody mezi 70°C a 90°C . V průběhu zkoušky musí být průměrný rozdíl výstupní a vstupní vody mezi 10 K a 25 K.

Musí být udržováno toto zvyšování teploty:

$$\frac{t_v - t_r}{2} - t_L \geq 35,0 \text{ K} \quad (9.1)$$

t_v ... teplota výstupní vody [$^{\circ}\text{C}$]

t_r ... teplota vstupní vody [$^{\circ}\text{C}$]

t_L ... teplota okolního prostředí [$^{\circ}\text{C}$]

Stanovení účinnosti kotle (přímá metoda)

Účinnost se stanovuje metodou přímého měření na základě výhřevnosti H_w

Nepřímá metoda umožňuje provedení doplňující kontroly přesnosti zkušebního zařízení na základě rovnováhy. Z tohoto lze rovněž stanovit hodnoty ostatních ztrát, např. ztráta zkušebním okruhem. Tyto ztráty nemají být přiřazovány k výkonu nebo k účinnosti kotle.

9.4 Stanovení hodnot emisí

Aritmetický průměr koncentrací CO_2 nebo O_2 , OGC, NO_x se stanovuje po celou dobu zkoušení, viz Tab. 19.1.

9.5 Výpočet

Tepelný výkon kotle

Tepelný výkon kotle je průměrný výkon zaznamenaný v průběhu doby zkoušení.

Tepelný příkon

Pro tyto výpočty se použijí rovnice z ČSN EN:304:1992.

9.6 Účinnost kotle

Účinnost kotle se uvádí v protokolu o zkoušce v procentech.

Přímá metoda

Při přímé metodě se účinnost kotle stanovuje podle

$$\eta = \frac{Q}{Q_B} \times 100\% \quad (9.1)$$

Nepřímá metoda

Tato metoda se používá pouze pro kontrolní účely.

Účinnost kotle se při nepřímé metodě stanovuje takto:

$$\eta = (1 - q_A - q_U - q_S - q_C) \times 100\% \quad (9.2)$$

q_A ...ztráta citelným teplem spalin

q_U ...ztráta neúplným spalováním

q_S ...ztráta sáláním, konvekcí a kondukcí

q_C ...ztráta podílem uhlíku v tuhých zbytcích

Emise při jmenovitém tepelném výkonu

Výpočet průměrných hodnot se provádí po celou dobu zkoušení pouze s ohledem na čas, nezávisle na průtoku spalin. Zaznamenané emisní hodnoty objemových složek v suchých spalínách se použijí pro výpočet průměrné hodnoty po celou dobu zkoušení.

Tyto průměrné hodnoty objemových složek (ppm) se použijí pro výpočet hmotnostních hodnot (mg/m^3). Pro převod z ppm na mg/m^3 se mají použít dále uvedené hodnoty:

$$f_{CO} = 1,2$$

$$f_{OGC} = 1,64 \text{ (je-li kalibračním plynem propan)}$$

$$f_{OGC} = 0,54 \text{ (je-li kalibračním plynem metan)}$$

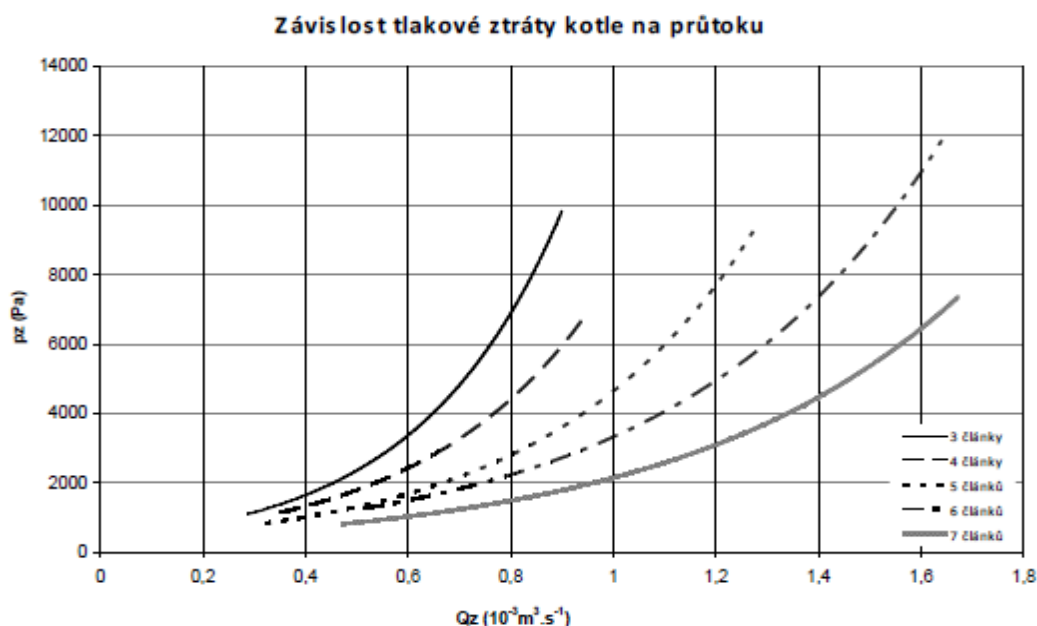
$$f_{NO_2} = 2,05$$

Koncentrace plynného, organicky vázaného uhlíku (OGC) se uvádějí jako uhlík. Zjištěná koncentrace oxidu dusíku (NO_x) se uvádí jako NO_2 .

Všechny zjištěné emisní koncentrace se uvádějí jako hmotnostní koncentrace (mg/m^3) přepočtené na suché spaliny při 10% kyslíku a normálním stavu (mg/m^3) a 1013 mbar.

Stanovení hydraulické ztráty

Hydraulická ztráta (naměřena v mbar) se stanovuje pro průtok, který je ekvivalentní se jmenovitým tepelným výkonem kotle při rozdílu teplot výstupní a vstupní vody $\Delta t = 10$ K a 20 K.



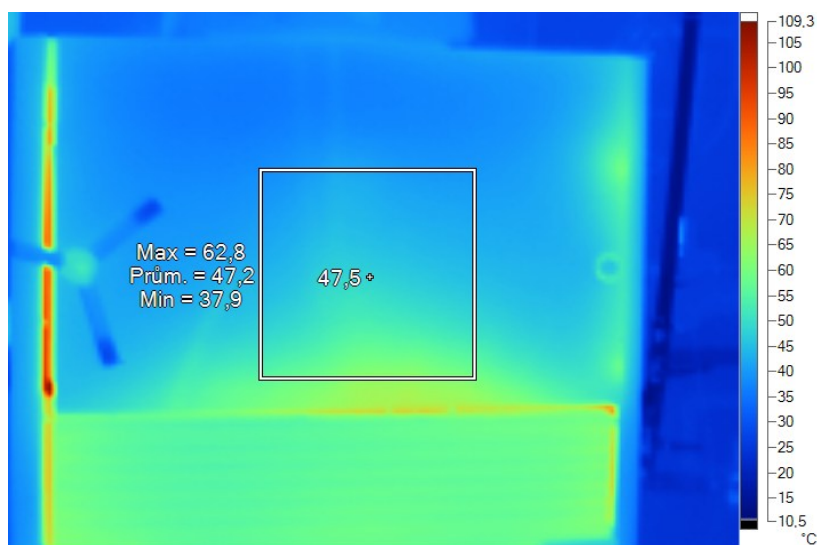
Obr. 9.1 Hydraulická ztráta kotle

Teplota povrchu Průměrná teplota povrchu se měří při jmenovitém tepelném výkonu. Měří se nejméně v pěti bodech na celém povrchu kotle. Při stejných podmínkách se měří kritické teploty (např. dvířka kotle, ovladače).[1]

10. Infračervené fotky pláště

V této kapitole jsou vyfoceny jednotlivé díly násypky kotle pomocí termografické kamery (viz kap. 13.6). Pro vysvětlení každého obrázku, stupnice vpravo zobrazuje teplotu. Čím nižší teplota, tím je barva více do modra a naopak čím teplejší tím je barva červenější. Na každém obrázku je teplota prostředního bodu a vyznačení maximální, minimální a průměrné teploty.

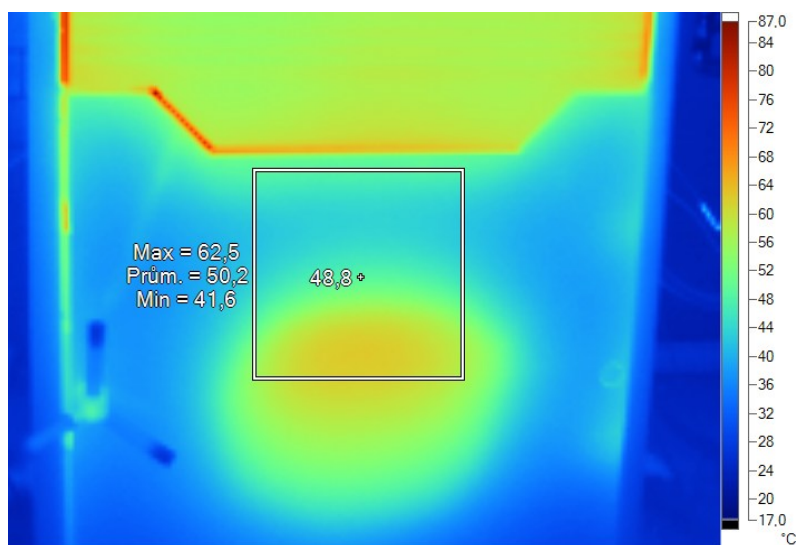
10.1 Vrchní dvířka



Obr. 10.1 Vrchní dvířka

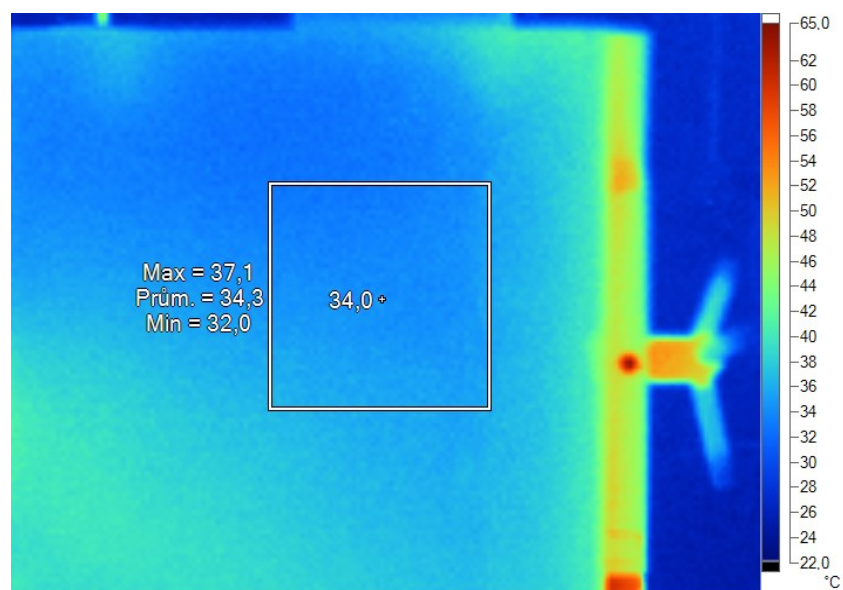
10.2 Spodní dvířka

Na této fotce jde vidět, že celá násypka i když je pod hrubou izolací, tak se hodně přehřívá. Firma Viadrus řešila problém s „borcením“ stěn násypky. Při měření kontaktním teploměrem bylo zjištěno, že se teplota stěn násypky pohybuje okolo 250 °C.



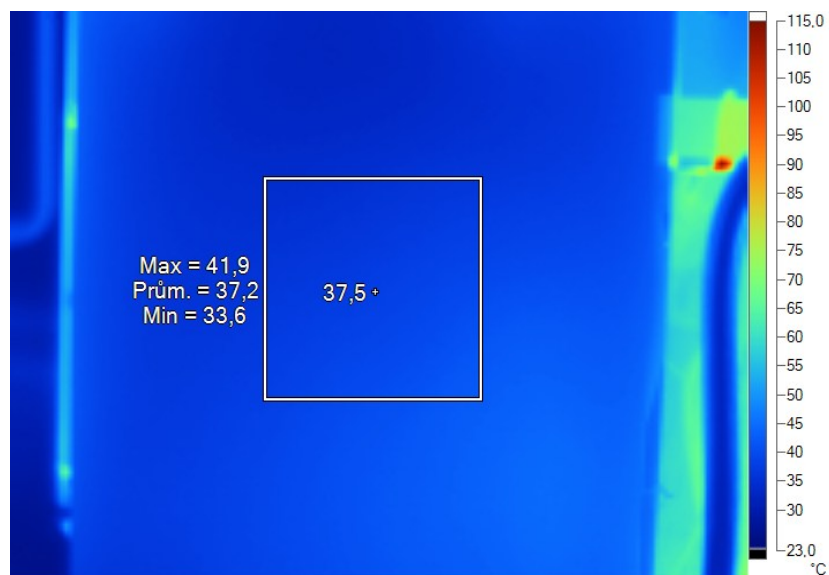
Obr. 10.2 Spodní dvířka

10.3 Levá strana



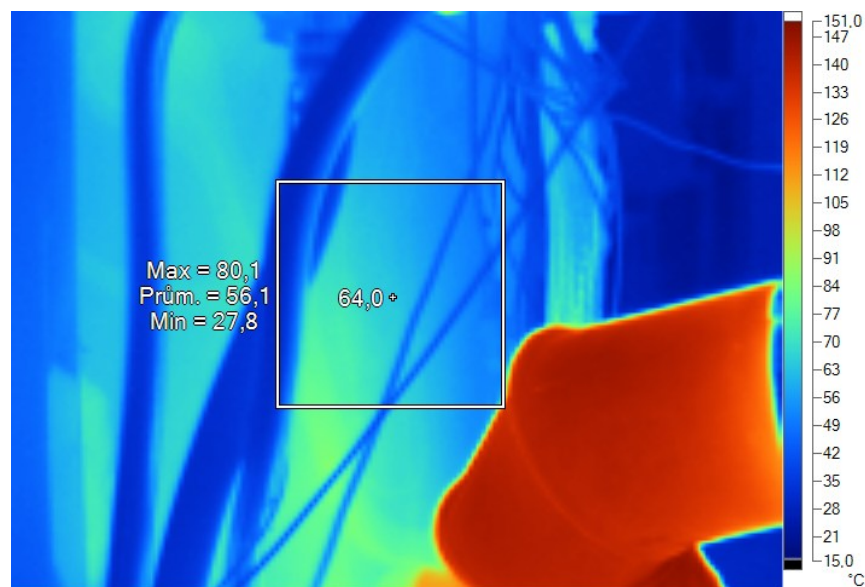
Obr. 10.3 Levá strana kotle

10.4 Pravá strana



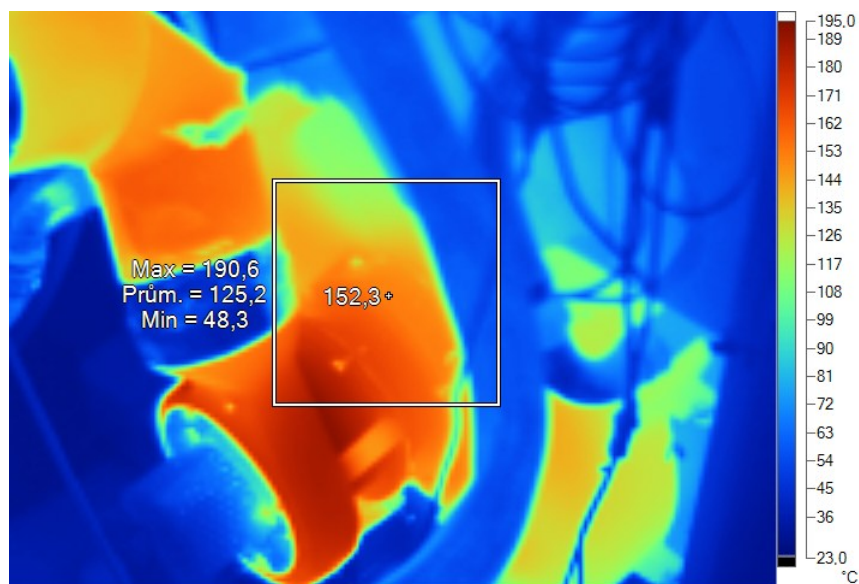
Obr. 10.4 Pravá strana kotle

10.5 Zadní část



Obr. 10.5 Zadní část kotle

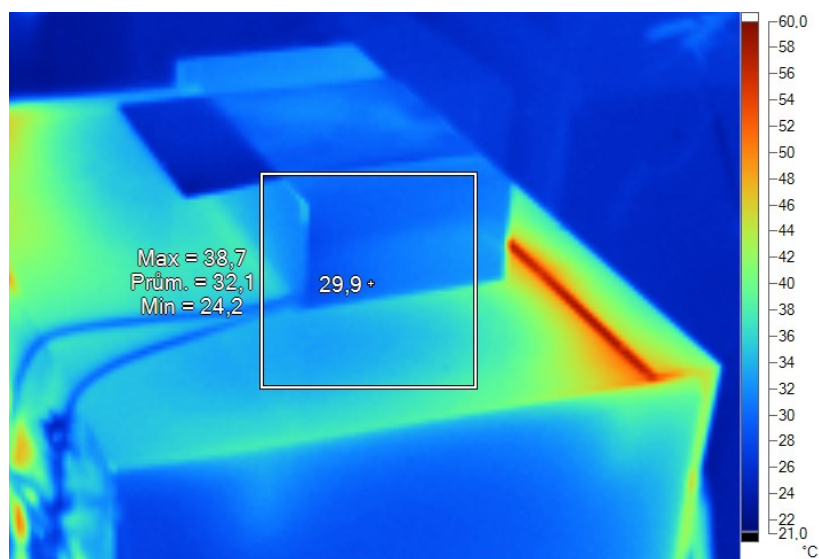
10.6 Kouřový nástavec



Obr. 10.6 Kouřový nástavec

Na této fotce vidíme obrovský problém, jelikož na kouřovém nadstavci není vůbec žádná izolace, tak průměrná teplota nadstavce je 125,2 °C. Proto je v těchto místech největší ztráta sáláním.

10.7 Vrch kotle

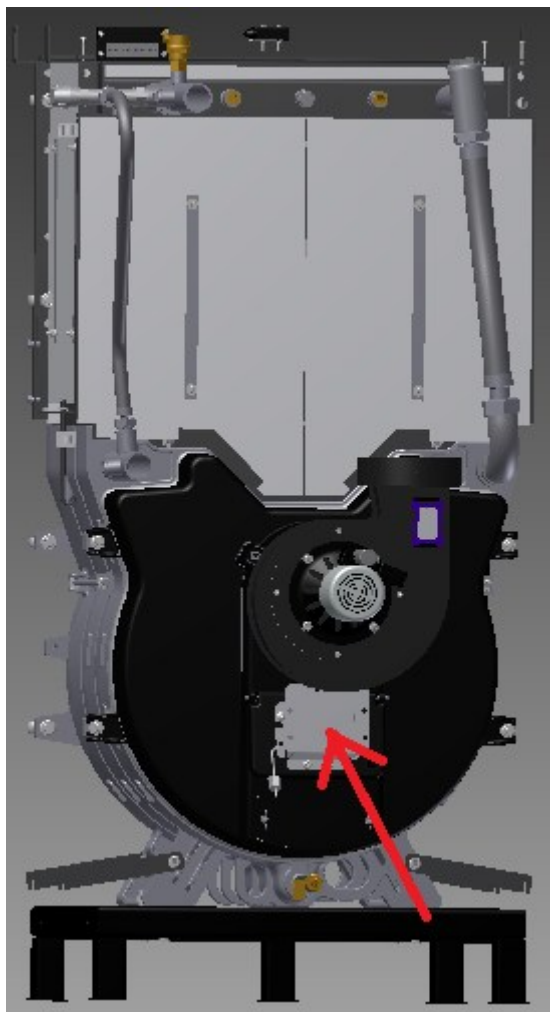


Obr. 10.7 Vrch kotle

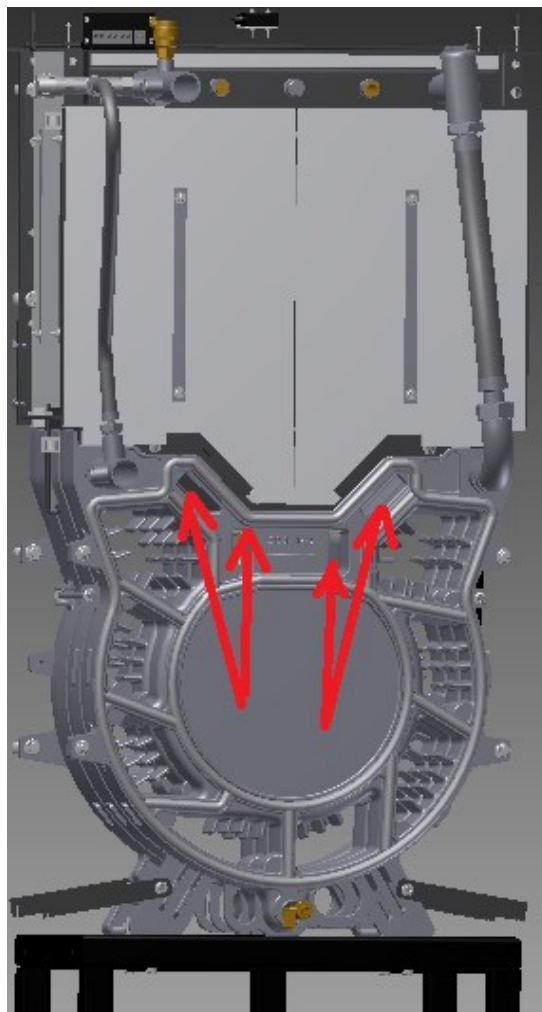
Jak vidíme, tak ostatní snímky jsou v pořádku a nejsou na nich nijak vysoké extrémní teploty. Za nejchladnější místa můžeme považovat boky a vrch kotle.

11. Původní proudění spalovacího vzduchu

Původní proudění spalovacího vzduchu bylo navrženo tak, že vzduch se nasával zezadu kotle, pomocí spalovacího ventilátoru (viz obr. 11.1), přes přírubu s klapkou a dále se ohříval, přes spalínový výměník v kouřovém nástavci. Tento již ohřátý vzduch se rozdělil do dvou otvorů (viz obr. 11.2) na primární a sekundární vzduch. Primární vzduch je níže, ten vede do spalovací trysky a sekundární vzduch vede do násypky pod šikmou keramikou.



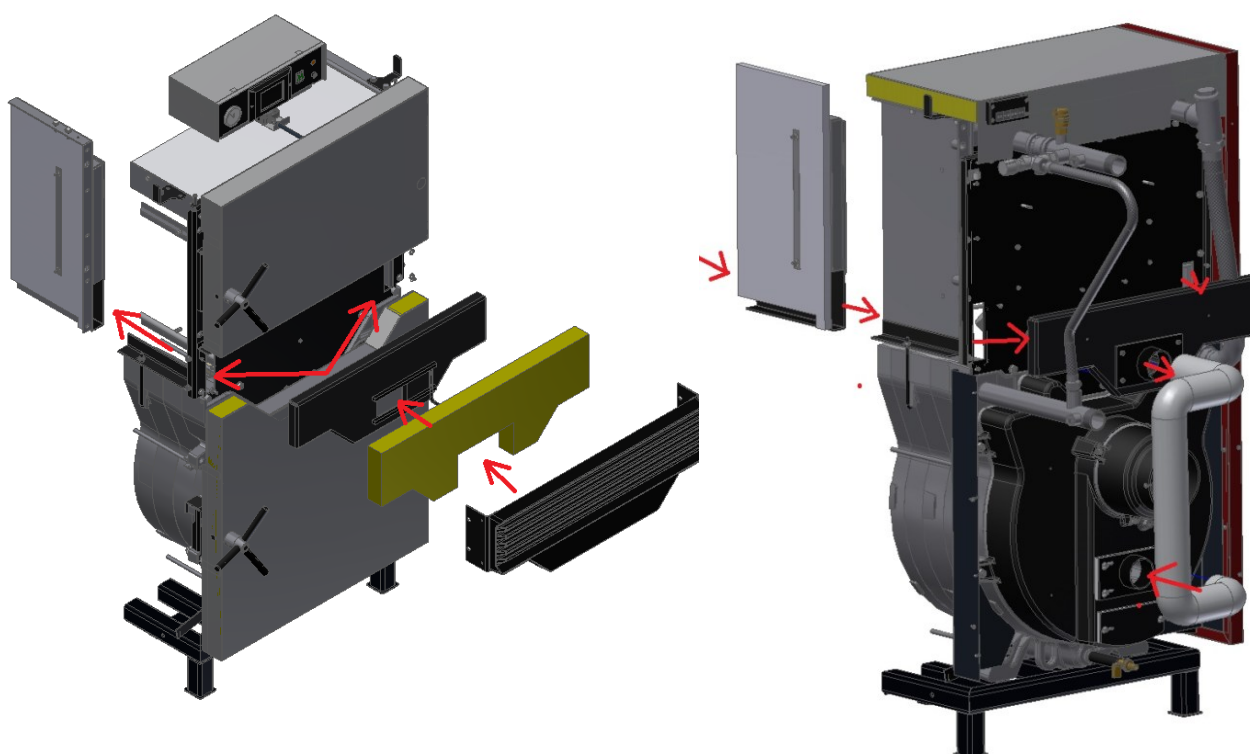
Obr. 11.1 Původní proudění přírubou



Obr. 11.2 Rozdělení primárního a sekundárního vzduchu

12. Změna proudění spalovacího vzduchu

Nová navržená změna proudění vzduchu spočívá v konstrukční úpravě násypky kotle. První problém, byl s přehříváním násypky. Takže přišel nápad proudění vzduchu změnit a to tak, že spalovací vzduch budu nasávat zepředu kotle, poté se povede boky násypky a pomocí trubky vyvedu již přehřátý vzduch do míst, kde původně vstupoval, což je do příruby s klapkou (Obr. 11.1). Místo příruby s klapkou byla vyrobena příruba z litiny (viz Obr. 12.6). Díky tomu, že po celých bocích bude proudit vzduch, tak nastanou dvě věci. Schladí se nám boky násypky kotle a zároveň se předejde vzduch na vyšší teplotu.



Obr. 12.1 Proudění vzduchu

Na obr. 12.1 vidíme směr proudění vzduchu, pomocí červených šipek, vzduch proudí předním dílem násypky až do kouřového nástavce.

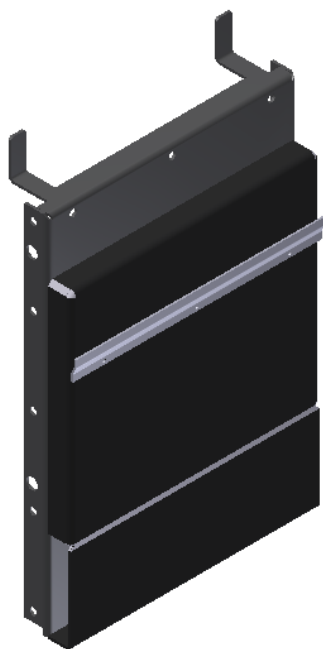
Nyní došlo k samotné úpravě násypky. Přední a zadní stěny násypky jsou z jednoduchého kotlářského plechu, boky jsou z dvojitého plechu, takže ty stačilo „jenom“ upravit.

12.1 Přední část



Obr. 12.2 Přední díl

Jelikož byl přední díl z jednoduchého plechu, tak se musel zdvojit, aby tudy mohl proudit spalovací vzuch. Původně byla přední část pod dvěma vrstvy izolace. První vrstva byla z materiálu Sibrál o tloušťce 20 mm a na ní skelná vata o tloušťce 40 mm. Tyto dvě vrstvy byly odstraněny. Na původní přední díl byl vyroben přední plech s otvorem. Měřením bylo zjištěno, že čím větší díra je v předním plechu, tím hůře kotel spaluje. Na plech byla vyrobena klapa, kterou lze přivírat a otvírat a tím regulovat proud spalovacího vzduchu. Tuto úpravu vidíme na obr. 12.2. Na původní díl byly vyřezány dvě díry obdélníkového průřezu o velikosti 140x30 mm. Přední plech je nakonec přivařen k přednímu dílu.



Obr. 12.3 Boční díl

12.2 Boky

Levý a pravý bok je shodný proto jej popíšu jen jednou. Zde se musel vytvořit kanál, aby zde mohl proudit vzduch zepředu až dozadu kotle. Tato úprava vypadá jednoduše, ale bylo zde hodně broušení a svařování



Obr. 12.4 Zadní díl

12.3 Zadní díl

Zadní díl je podobný jako přední. Nechal jsem na něj zavařit plech, který je skoro stejný jako v případě předního plechu, Jen jsem ho musel nechat malinko upravit. Do původního zadního dílu byly udělány dvě díry, stejně velké jako do předního dílu. Na zadní díl byl přivařen zadní plech, a na zadní plech byl přišroubován čtyřmi šrouby přírubu z litiny. Na tuto přírubu jsem namontoval hliníkovou trubici. Na zadním díle byla také izolace Sibrál o tloušťce 20 mm, ta byla po menších úpravách zachována.

12.4 Trubice

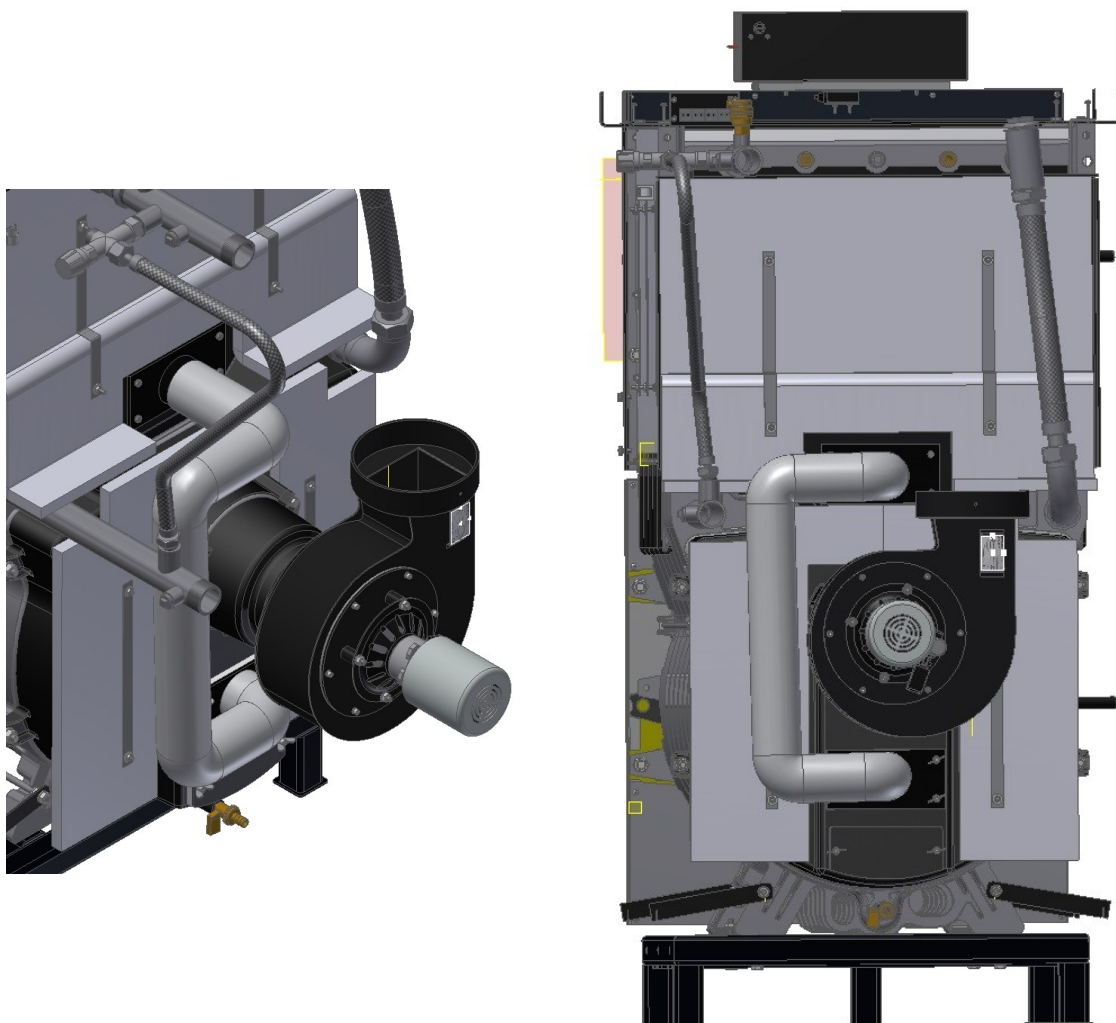
Další vyrobenou částí na proudění vzduchu byla trubice, s kterou byl spojen zadní díl a kouřový nástavec. Byla použita hliníková trubici na rozvod vzduchu, tato trubice má tloušťku 0,1 mm a lze ji různě tvarovat. Lze ji použít do teploty 250°C. Trubice je vidět na obr. 12.6, kde je napojena na kotli.



Obr. 12.5 Hliníková trubice

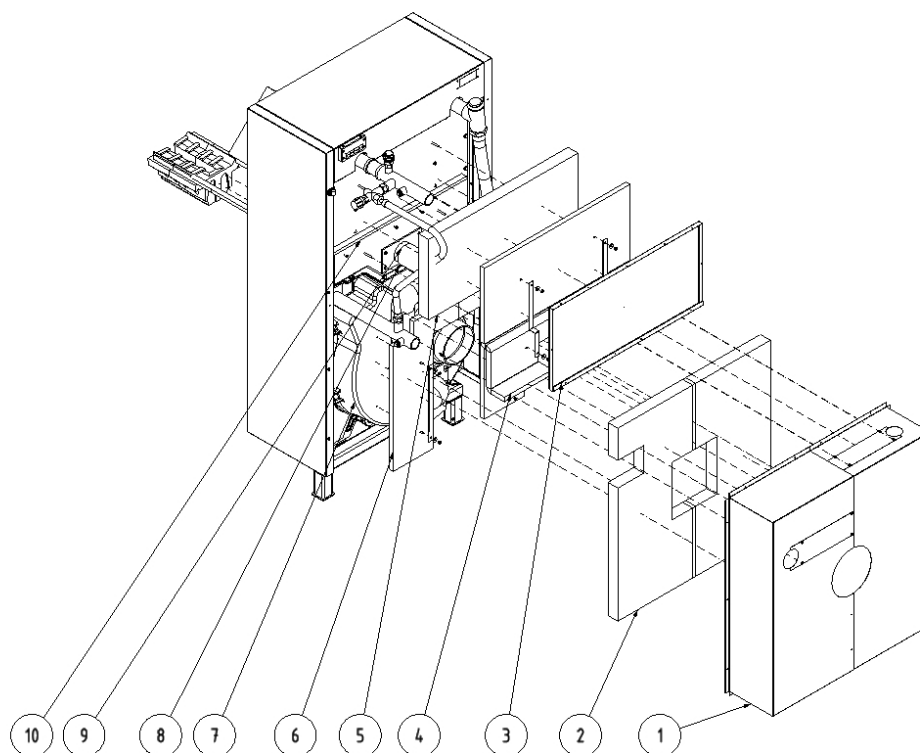
12.5 Kouřový nástavec

Kouřový nadstavec se nemusel vyrábět, jen se musel poupravit. Byla odstraněna příruba na vstup vzduchu do nástavce a místo ní byla použita příruba, která se nachází na zadním plechu násypky. Po namontování příruby, se napojila hliníková hadice. Teď by byla úprava skoro hotova.



Obr. 12.6 Pohled zezadu kotle

Poté byla navržena izolace na kouřový nástavec. Půjde o dvě izolace. První izolace je z materiálu Sibrál o tloušťce 20 mm. Druhá izolace je ze skelné vaty a má tloušťku 40 mm. Izolace ze skelné vaty, materiál Rotaflex bude přidělena ke krycímu plechu kouřového nástavce. Krycí plech je vyroben z obyčejného plechu o tloušťce 0,8 mm. Zakrývá celý kouřový nástavec. Díky dvěma izolacím se podařilo snížit teplotu kouřového nástavce z 150°C na 60°C. Sestavu kouřového nástavce s izolací a krycím plech vidíme na Obr 12.7.



Obr. 12.7 Pohled zezadu kotle

- | | |
|--|--|
| 1. Zadní krycí plech na kouřový nástavec | 6. Izolace zadního plechu násypky-Rotaflex |
| 2. Izolace krycího plechu | 7. Sestava kouřového nástavce |
| 3. Zadní krycí plech násypky | 8. Trubice |
| 4. Izolace zadního plechu násypky | 9. Litinová příruba |
| 5. Izolace kouřového nástavce | 10. Zadní díl násypky |

13. Měřicí zařízení

13.1 Měřicí stanice

Na měření emisí byla použita měřicí stanice AFRISO EURO-INDEX A02020.

Tato stanice umí měřit emise CO, CO₂, OGC, NO, O₂. Na měření teplot se používá menší stanice. Ta měří teplotu vstupní, výstupní, chladicí vody, spalín. Dále teplotu okolí, a pokud se měří plynné palivo, tak měří i teplotu plynu.

To vše se zaznamenává do počítače, kde pomocí softwaru MS+ a COMET, odkud tyto hodnoty můžu číst a uložit do formátu xls.

Na obrázku 13.1 vidíme, jak vypadá měřicí stanice. Není to žádná maličkost. Stojí přibližně něco přes milion korun. Jak vidíme na obrázku tak přímo na stanici je displej, kde se zobrazují aktuální hodnoty.



Obr. 13.1 Měřicí stanice

13.2 Vodoměr

Pro měření průtoku vody byl použit vodoměr OPTIFLUX 300 F od firmy KROHNE. Jde o magneticko- indukční průtokoměr, který se používá např. pro měření průtoku vody.

Toto zařízení obsahuje elektromagnetický převodník Optiflux IFC 300. Tento univerzální převodník je výkonným a ekonomickým řešením pro širokou škálu aplikací. Dokáže měřit průtok chemikálií, papíru, vody, léků, kovů, nafty, plynu atd. Dokáže pracovat v teplotách od -25°C až do 120°C.



Obr. 13.2 Vodoměr OPTIFLUX

13.3 Manometr

Pro změření tahu komína byl použit Digitální manometr DM 9200. Dále se tento manometr používá pro seřizování tlaku trysek, seřizování plynových hořáků kotlů, měření rozdílových tlaků a neřestností. Jako médium může být použit jakýkoliv neagresivní plyn.

Na manometru lze nastavit tzv. nulový bod a od toho bodu se měří např. komínový tah. K manometru se připojuje silikonová hadička.



Obr. 13.3 Manometr

13.4 Měření teploty

Pro měření teplot byl použit dotykový a bezdotykový teploměr.

Dotykový teploměr

Byl použit teploměr ALMEMO 2090. Tento teploměr je vcelku jednoduchý. Na displeji zobrazuje buď měřenou teplotu, nebo napětí baterie. K teploměru je připojen Termočlánek NiCrNi typu K. Měřicí rozsah Termočlánu je od -60 °C do 250 °C.



Obr. 13.4 Dotykový teploměr

Bezdotykový teploměr

Byl použit bezkontaktní teploměr Raytek Raynger ST 25-814. Využívá infračerveného paprsku. Použití od -32°C až do 400°C .



Obr. 13.5 Bezdotykový teploměr

13.5 Vlhkost dřeva

Pro kontrolu vlhkosti dřeva byl použit měřicí přístroj Greisinger GMH 3810. Jde o kompaktní přístroj k měření vlhkosti dřeva, vlhkosti omítek, vlhkosti staveb. Díky zabudované měřicí jehle je možno provést velké množství měření bez dalšího příslušenství. Zařízení obsahuje 464 uložených charakteristik dřeva 28 křivek stavebních hmot.



Obr. 13.6 Greisinger

13.6 Termografická kamera

Na focení zahřátého kotle byla použita, termo kameru FLUKE Ti32. Tato kamera má infračervený objektiv s vysokým prostorovým rozlišením až $0,63\text{ mRad}$. Teplotní rozsah objektivu je od -20°C až do 600°C . Kombinuje vlastnosti bodového teploměru s vlastnostmi termo kamery. Pomocí ultratenkých pyroelektrických snímačů je možno vytvářet infračervenou teplotní mapu. Fotí snímky v rozlišení 320×240 pixelů.



Obr.13.7 Termografická kamera

13.7 Přístroj na měření rychlosti vzduchu

Pro měření rychlosti proudění vzduchu do kotle byl použit měřicí přístroj ALMEMO 2690-8A. Jde o kombinovaný univerzální ruční měřicí přístroj s pěti univerzálními vstupy a dvěma výstupy a vnitřní pamětí EEPROM pro uložení až 200 000 měřených hodnot. Obsahuje vestavěný snímač atmosférického tlaku pro korekce měření některých veličin. K tomuto měřiči jsem měl připojený vrtulkový anemometr. Ten je schopný měřit i malé rychlosti už od $0,01 \text{ m.s}^{-1}$. Ložiska anemometru byly z diamantu, aby měli co nejmenší odpor.

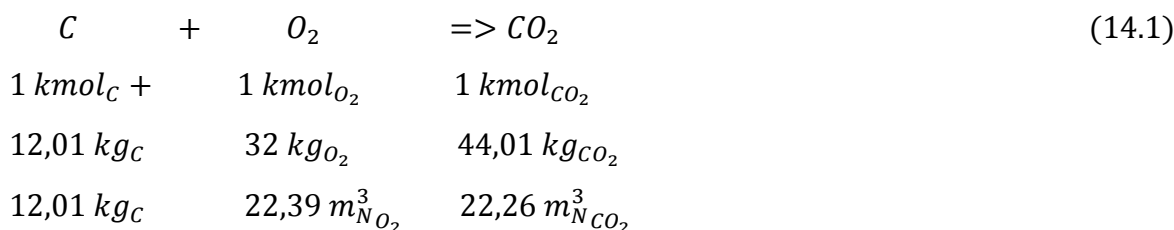


Obr. 13.8 přístroj ALMEMO

14. Výpočty:

14.1 Stechiometrie spalování

Spalovací reakce uhlíku a kyslíku



Hmotnostní vyjádření

Pro spálení 1 kg C je zapotřebí $32:12,01=2,667 \text{ kg } O_2$

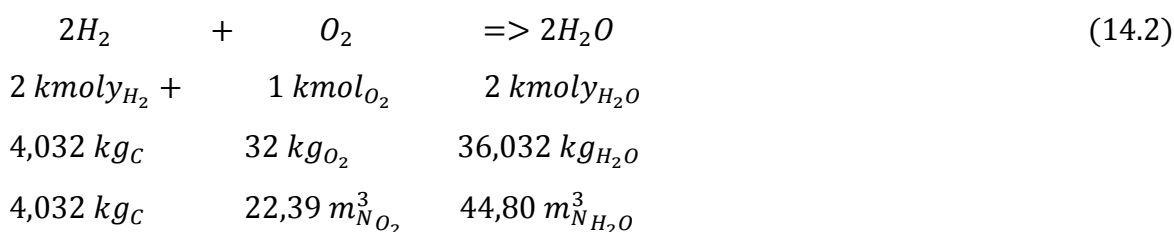
Spálením 1kg C vznikne $44,01:12,01= 3,667 \text{ kg } CO_2$

Objemové vyjádření

Pro spálení 1kg C je zapotřebí $22,39:12,01= 1,865 \text{ m}^3_{N_{O_2}}$

Spálením 1 kg C vznikne $22,26:12,01= 1,855 \text{ kg } m^3_{N_{CO_2}}$

Spalovací reakce vodíku a kyslíku



Hmotnostní vyjádření

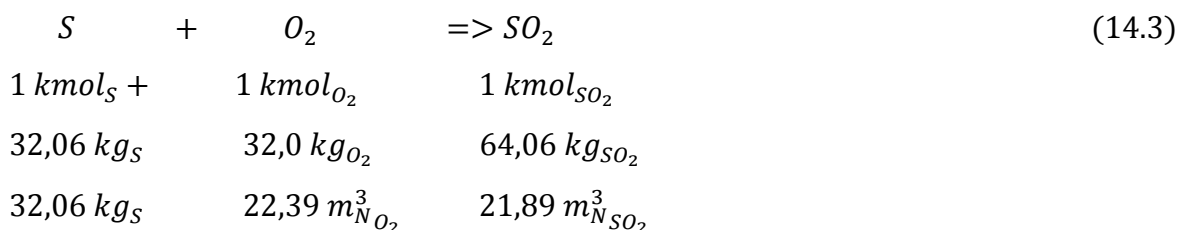
Pro spálení 1kg H_2 je zapotřebí $32:4,032= 7,9737 \text{ kg}_{O_2}$

Spálením 1 kg H_2 vznikne $36,032:4,032=8,937 \text{ kg}_{H_2O}$

Objemové vyjádření

Pro spálení 1 kg H_2 je zapotřebí $22,39:4,032= 5,553 \text{ m}^3_{N_{O_2}}$

Spálením 1kg H_2 vznikne $44,8:4,032= 11,111 \text{ m}^3_{N_{H_2O}}$

Spalovací reakce síry a kyslíku

Hmotnostní vyjádření

Pro spálení 1 kg S je zapotřebí 32:32,06=0,998 kg O₂

Spálením 1kg S vznikne 64,06:32,06=1,998 kg SO₂

Objemové vyjádření

Pro spálení 1 kg S je zapotřebí 22,39:32,06= 0,699 m³_{N_{O₂}}

Spálením 1 kg S vznikne 21,89:32,06= 0,683 m³_{N_{SO₂}}

[9]

Výpočty z kapitoly 13 a 14 jsou z normy ČSN EN 304.[2]

14.2 Teoretické množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva

$$O_{min} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C + \frac{22,39}{4,03} \cdot H + \frac{22,39}{32,06} \cdot S - \frac{22,39}{32} \cdot O \left[\frac{m^3_{NO_2}}{kg \text{ pal}} \right] \quad (14.4)$$

Cobsah uhlíku v surovém vzorku paliva [%]

Hobsah vodíku v surovém vzorku paliva [%]

Sobsah síry v surovém vzorku paliva [%]

Oobsah kyslíku v surovém vzorku paliva [%]

$$O_{min} = 1,865 \cdot C + 5,553 \cdot H + 0,699 \cdot S - 0,700 \cdot O \quad (14.5)$$

14.3 Teoretické množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{21} \left[\frac{m^3_{vz}}{kg \text{ pal}} \right] \quad (14.6)$$

14.4 Stechiometrický objem suchých spalín

$$V_{Atrmin} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + O_{min} \cdot \frac{0,79}{0,21} \left[\frac{m^3_{Nsp}}{kg \text{ pal}} \right] \quad (14.7)$$

14.5 Přebytek vzduchu

$$\alpha = 1 + \frac{V_{Atr\ min}}{L_{min}} \cdot \frac{O_2'}{21 - O_2} \quad (14.8)$$

O_2 ... naměřený kyslík ve spalínách [%]

O_2' ... referenční kyslík [%]

14.6 Spaliny:

Oxid uhličitý

$$V_{CO_2} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C \quad (14.9)$$

Oxid siřičitý

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S \quad (14.10)$$

Dusík

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot N \quad (14.11)$$

Voda

$$V_{H_2O} = \frac{44,80}{4,032} \cdot H + \frac{22,4}{18} \cdot W \quad (14.12)$$

Maximální koncentrace oxidu uhličitého

$$CO_{2max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{Atrmin}} \quad (14.13)$$

Maximální koncentrace oxidu siřičitého

$$SO_{2max} = \frac{V_{SO_2}}{V_{Atrmin}} \quad (14.14)$$

14.7 Objem suchých spalín skutečně vzniklých

$$V_{Atr} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{(CO_2 + SO_2)' + CO'} \left[\frac{m_{Nsp}^3}{kg\ pal} \right] \quad (14.15)$$

14.8 Výpočet jmenovitého tepelného výkonu

$$Q_N = w_1 \cdot c_{w1} \cdot (t_w - t_E) \quad [W] \quad (14.16)$$

w_1hmotnostní průtok studené vody na vstupu do zařízení [kg.s⁻¹]

c_{w1} střední měrná tepelná kapacita vody při $\frac{t_w + t_E}{2}$ [J.kg⁻¹.K⁻¹]

t_Eteplota vstupní studené vody [°C]

t_w výstupní teplota vody [°C]

14.9 Tepelný příkon

$$Q_B = B \cdot H_U \quad [W] \quad (14.17)$$

B ... hmotnostní průtok paliva $[kg \cdot s^{-1}]$

H_U ... výhřevnost $[J \cdot kg^{-1}]$

15. Výpočet poměrných tepelných ztrát

15.1 Účinnost kotle přímá metoda

$$\eta_K = \frac{Q}{Q_b} \quad (15.1)$$

15.2 Nepřímá metoda

Má sloužit pouze k ověření přesnosti zkušebního zařízení

$$\eta_K = 1 - q_A - q_U - q_S - q_C \quad (15.2)$$

q_A ... poměrná ztráta citelným teplem spalin (hodnoty při daném tepelném příkonu)

q_U ... poměrná ztráta plynným nedopalem (hodnoty při daném tepelném příkonu)

q_S ... poměrná ztráta sdílením tepla do okolí (hodnoty při daném tepelném příkonu)

q_C ... ztráta podílem uhlíku v tuhých zbytcích po spalování (hodnota vztažena k tepelnému příkonu)

Poměrná ztráta citelným teplem spalin q_A

Následující vzorec platí, pouze v případě, že spalovací vzduch a palivo je přiváděno do spalovacího prostoru bez předehřátí

$$q_A = \frac{V_A \cdot C_{pmAtr}}{H_U} \cdot (t_A - t_L) \quad (15.3)$$

V_A je objem suchých spalin na kg nebo m^3 spáleného paliva [$m^3 \cdot kg^{-1}$]

t_A teplota spalin [$^{\circ}C$]

t_L teplota okolního prostředí [$^{\circ}C$]

C_{pmAtr} střední měrná tepelná kapacita spalin v rozmezí t_L až t_A [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]

H_U výhřevnost paliva [$J \cdot kg^{-1}$]

V případě, že přebytek vzduchu nezajišťuje dokonalé spalování, může být objem suchých spalin stanoven následujícím způsobem

a) Suché spaliny

$$V_{Atr} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{CO} + V_{N_2} + V_{O_2} = \frac{V(CO_2 + SO_2) + V_{CO}}{(CO_2 + SO_2) + CO} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (15.4)$$

Kde

V_{CO_2} je stechiometrická koncentrace oxidu uhličitého CO_2 [$m^3 \cdot kg^{-1}$]

V_{SO_2} je stechiometrická koncentrace oxidu siřičitého SO_2 [$m^3 \cdot kg^{-1}$]

V_{CO} je stechiometrická koncentrace oxidu uhelnatého CO [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

V_{N_2} je stechiometrická koncentrace dusíku N_2 [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

$(CO_2 + SO_2)$..zjištěná objemová koncentrace $(CO_2 + SO_2)$ ve spalínách [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]

CO.....zjištěná objemová koncentrace CO ve spalínách [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]

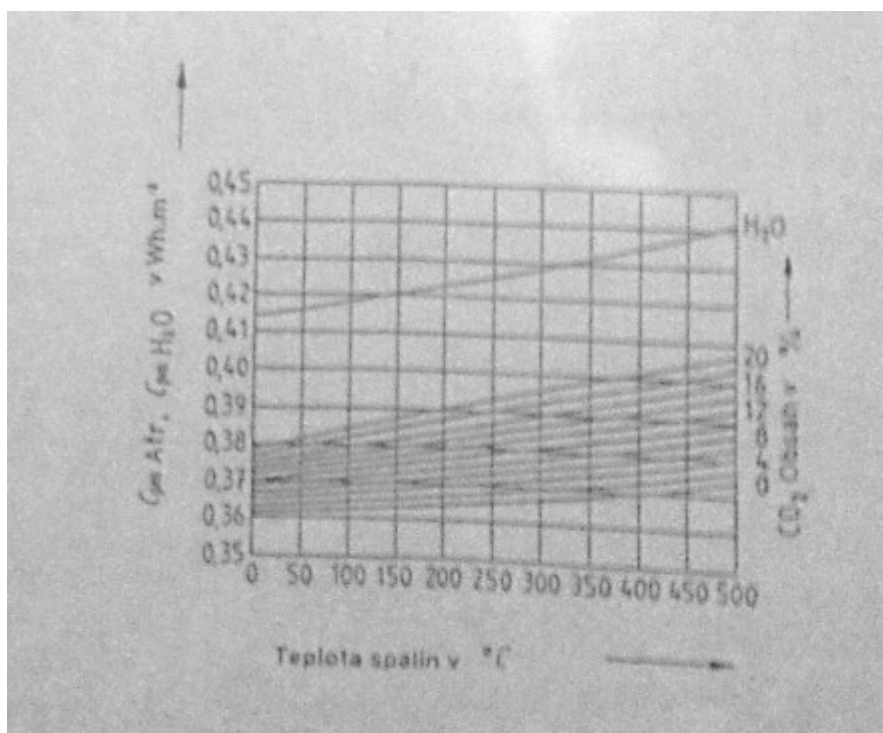
b) Objem vodní páry V_w vyplývající z obsahu vody ve spalovacím vzduchu a spalovaných složkách paliva v $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ nebo $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ se může zanedbat

V případě, že objem vodní páry je oddělen od objemu suchých spalín bude mít rovnice tvar

$$q_A = (V_{Atr} \cdot C_{pmAtr} + V_w \cdot C_{pmH_2O}) \cdot (t_A - t_L) \cdot \frac{1}{H_V} \quad (15.5)$$

C_{pmAtr} je střední měrná tepelná kapacita suchých spalín v rozsahu teplot t_L až t_A [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]

C_{pmH_2O} je střední měrná tepelná kapacita vodní páry v rozsahu teplot t_L až t_A [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]



Obr. 15.1 Měrná tepelná kapacita

Střední měrná tepelná kapacita pro suché spaliny a vodní páru při teplotě spalín:

$T_a < 500 \text{ } ^\circ\text{C}$

Pro spaliny

$$C_{pmAtr} = \left[0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right)^2 + 0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right) - 0,14 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{CO_2}{100\%} \right) + 0,3 \cdot \left[\left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{CO_2}{100\%} \right)^2 \quad (15.6)$$

Pro vodní páru

$$C_{pmH_2O} = 0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right)^2 \quad (15.7)$$

C_{pmAtr} je střední měrná tepelná kapacita suchých spalin t_A [Wh. m⁻³. K⁻¹]

C_{pmH_2O} střední měrná tepelná kapacita vodní páry [Wh.m⁻³.K⁻¹]

Poměrná tepelná ztráta q_U

Jestliže jedinou nespálenou složkou spalin je CO v %, výsledná ztráta se rovná

$$q_U = CO \cdot V_{Atr} \cdot \frac{12,64}{H_U} \quad (15.8)$$

CO... naměřené CO [%]

Poměrná tepelná ztráta q_s

Tuto ztrátu je nutno stanovit pro zjištění účinnosti nepřímou metodou, přibližně se zjišťuje následujícím způsobem.

Vnější povrch kotle se rozdělí na dílčí části s obdobnými teplotami (izolovaný povrch, dvířka, přípojky odvodu spalin, připojovací potrubí, podložka kotle), která se měří podle dotykových teploměrů. Sdílený tepelný tok z jednotlivých dílčích částí povrchu se vypočte podle vzorce

$$Q_x = F_x \cdot \alpha \cdot (t_m - t_L) \quad [W] \quad (15.9)$$

Q_x ... je sdílený tepelný tok z jednotlivých dílčích částí povrchu

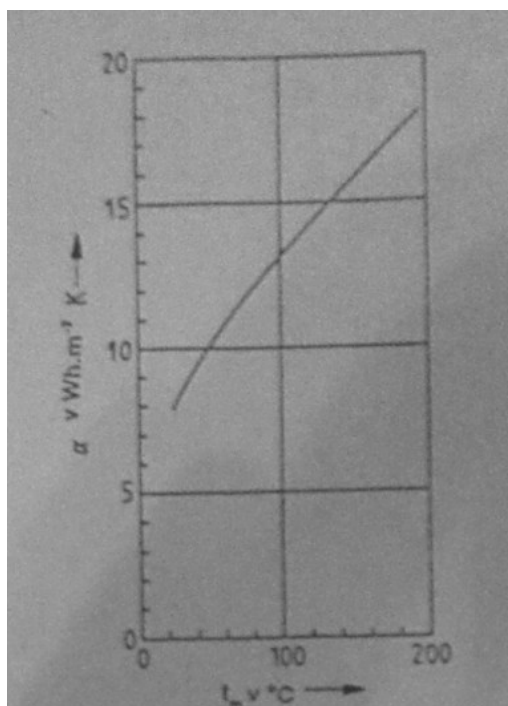
F_x ... plošný obsah dílčích částí povrchu [m²]

α ...součinitel přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹]

t_m ...průměrná povrchová teplota dílčích částí povrchu [°C]

t_L ... teplota okolního prostředí (měřeno v 7 bodech 1,5 m od čela kotle ve výšce odpovídající polovině výšky kotle [°C])

Přibližné hodnoty součinitelů přestupu tepla v závislosti na teplotě povrchů se určí z obrázku.



Obr. 15.2 Součinitel přestupu tepla

Poměrná ztráta q_S se může vypočítat z:

$$q_S = \frac{\sum Q_x}{Q_B} \quad (15.10)$$

[2]

Ztráta mechanickým nedopalem q_C

Pro stanovení této ztráty je nutné provést chemický rozbor paliva a zjistit podíl nespáleného uhlíku v něm. Musíme také znát poměrné množství popela (tj. kolik popela vznikla z daného množství paliva).

$$q_C = 32,7 \cdot \frac{c_Z}{Q_N} \quad (15.11)$$

c_Z ... hmotnostní podíl uhlíku v pevných zbytcích spalování vztažený na jednotku paliva [%]

Stanovit hodnotu c_Z u paliva, kde je podíl popeloviny menší než 1%, je nemožné pouhým okem. Pokus popel obsahuje zuhelnatělé kusy dřeva, tak se pohybuje tato hodnota kolem 4%. U tmavého popela s malými kousky dřeva okolo 1%. U jemného světlého popílku cca 0,1%. Jelikož sem neměl u sebe laboratoř, kde bych přesně zjistil tuto hodnotu, tak vezmu průměr 0,5%. [4]

Hydraulický odpor na straně vody

$$H_w = \xi \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \cdot 10^{-2} \quad [mbar] \quad (15.12)$$

H_wje hydraulický odpor na straně vody

ξ součinitel hydraulického odporu

ρ hustota vody 1000 [kg.m⁻³]

$$H_w = \frac{p \cdot g}{10^5} \quad (15.13)$$

p ...výška sloupce [mm]

g ... gravitační zrychlení 9,81 [m.s⁻²]

$$v = \frac{W \cdot 4}{\pi \cdot d^2} \quad (15.14)$$

v ... rychlost v průřezu přípojek [m.s⁻¹]

w ... průtok vody [m³.s⁻¹]

D ... jmenovité světlosti vstupních a výstupních přípojek kotle [m]

[2]

16. Sdílení tepla

Zde bude vypočteno, jak velkou energii předají stěny kotle spalovacímu vzduchu, jde tedy o přenos tepla.

Spalovací vzduch je nasáván zepředu kotle, z předního plechu. Poté proudí boky násypky, kde teplota násypky je okolo 250°C. Vzduch proudí zadem kotle do hliníkové trubice, která ústí do kouřového nástavce. V kouřovém nástavci se nachází výměník, kde proudí na jedné straně spaliny a na druhé spalovací vzduch, teplota v něm se pohybuje okolo 180°C. Poté se vzduch rozdělí na primární a sekundární vzduch. Primární vzduch proudí do násypky pod keramickými deskami, kde se přihřeje na 300°C. Sekundární vzduch proudí do keramické trysky, kde se dále mísí s produkty zplyňování. Proudění vzduchu je naznačeno na obr. 12.1.

V rámci výpočtu bude počítán pouze výpočet ohřevu vzduchu pouze pro stěny násypky a až do hliníkové trubice. Od spalinového výměníku je proudění vzduchu stejné, jako před změnou.

Sdílení tepla- teorie

Přenos nebo také sdílení tepla je složitý děj. Jako sdílení tepla označujeme přenos (transport) tepelné energie mezi tělesy o nestejně teplotě nebo uvnitř určitého tělesa mezi místy o nestejně teplotě. K šíření tepelné energie dochází společným působením tří základních druhů sdílení tepla:

- Tepelná výměna vedením (kondukcí)
- Tepelná výměna prouděním (konvekcí)
- Tepelná výměna sáláním

16.1 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením probíhá, tak že teplo se přenáší ve směru klesající teploty. Základním zákonem vedení tepla je Fourierův zákon, který udává vztah mezi hustotou tepelného toku a teplotním gradientem

$$q = -\lambda \cdot \text{grad} t \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (16.1)$$

q Hustota tepelného toku

λ Součinitel tepelné vodivosti, závisí na druhu látky a u téže látky se mění s teplotou [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$\text{grad} t$..Teplotní gradient [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$]

Vedení tepla stěnou

$$q = \frac{\lambda}{l} \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (16.2)$$

t_1 ... Teplota na vnější straně [°C]

t_2 ... Teplota na vnitřní straně [°C]

Tato rovnice platí pro jednoduchou stěnu.

Prostup tepla stěnou

$$q = k \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (16.3)$$

k ... součinitel prostupu tepla stěnou [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

Je dán společným působením všech základních druhů přenosů tepelné energie.

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (16.4)$$

t_1, t_2 střední teploty teplejší a chladnější stěny [°C]

α_1, α_2 ... součinitele přestupu tepla teplejší a chladnější stěny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

l_i tloušťka i -té vrstvy [m]

α_i součinitel tepelné vodivosti i -té vrstvy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

16.2 Přenos tepla prouděním (konvekci)

Tepelné proudění nelze oddělit od vnějšího pohybu hmotného prostředí a přichází proto v úvahu pouze u tekutin (kapalin a vzdušin). Přenos mezi tekutinou a pevným povrchem při jejich přímém styku se nazývá přestup tepla. Pro určení tepelného tok se používá Newtonova rovnice:

$$Q = \alpha \cdot (t_s - t_f) \cdot S \quad [W] \quad (16.5)$$

α ... součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

t_s ... teplota tekutiny [°C]

t_f ... teplota stěny [°C]

Hodnota součinitele přestupu tepla závisí na fyzikálních charakteristikách tekutiny, záleží tedy na teplotě t_s a t_f , tvaru obtékaného tělesa a směru proudění vzhledem k jeho povrchu.

Nejnižší hodnotu součinitele přestupu tepla je při volné konvekci. Kdy k pohybu dochází v důsledku rozdílných teplot stěny a tekutiny. Pokud je pohyb vzdušiny vnějším činitelem, např. ventilátor nebo čerpadlo, tak jde o vynucenou konvekci.

Jelikož spalovací vzduch je poháněn spalovacím ventilátorem, tak jde v mém případě o vynucenou konvekci. Vynucená konvekce se dělí na proudění v trubkách a kanálech a konvekce při obtékání těles. V mém případě jde o variantu první. Pro proudění v trubkách a kanálech platí následující vzorec.

Hydraulický průměr

Charakteristický rozměr je rozměr vnitřní trubky, pokud to není trubka, ale kanál, tak se použije ekvivalentní hydraulický průměr

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{o} \quad [m] \quad (16.6)$$

S... Průřez kanálu [m²]

o... obvod kanálu [m]

Výpočty se rozdělují vzhledem k tomu, zda je proudění laminární, v přechodové oblasti nebo turbulentní. V tomto případě se jedná o turbulentní proudění.

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_R \cdot \varepsilon_L \quad (16.7)$$

Re... Reynoldsovo kritérium, rovnice platí pro Re>10 000, Pr>0,7

Pr... Prantlovo kritérium, rovnice platí pro Pr>0,7

ε_t ...opravný součinitel na neizotermické proudění

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}$$

Pr... Prandtlovo kritérium pro plyn

Pr_s...Prandtlovo kritérium pro stěnu

Teplotní součinitel pro plyny:

T_s/T	ε_t
0,5 až 1	$1,27 - 0,27 \cdot T_s/T$
1 až 3,5	$(T_s/T)^{-0,55}$

Tab. 17.1 Teplotní součinitel pro plyn

T_s/T ... absolutní teploty stěny a tekutiny v K

ε_R ... opravný součinitel pro oblouky

$$Re'_{kr} < Re < Re''_{kr} \Rightarrow \varepsilon_R = 1 \quad (16.8)$$

$$Re > Re''_{kr} \Rightarrow \varepsilon_R = 1 + 1,8 d/R \quad (16.9)$$

d... průměr potrubí [m]

R... poloměr zaoblení [m]

Kritické hodnoty Reynoldsova kritéria

$$Re'_{kr} = \frac{16,4}{\sqrt{d/R}} \quad (16.10)$$

$$Re''_{kr} = 18500 \cdot \left(\frac{d}{2R}\right)^{0,28} \quad (16.11)$$

ε_L ... opravný součinitel pro krátké trubky

ε_L									
l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
Re=2.10 ⁴	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,00
Re=5.10 ⁴	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1,00
Re=1.10 ⁵	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1,00

Tab. 17.2 Opravný součinitel pro krátké trubky

Z délky kanálu a průměru plyne ε_L .

Použil jsem $\varepsilon_L = 1,18$

Použité kritériální rovnice

Nusseltovo kritérium

Charakterizuje přenos tepla v mezní vrstvě u stěny

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (16.12)$$

L... charakteristický rozměr [m]

λ ... součinitel tepelné vodivosti materiálu stěny [W.m⁻¹.K⁻¹]

Reynoldsovo kritérium

Kritérium, podle kterého se určuje proudění, do hodnoty 2320 je proudění laminární, od této hodnoty výše turbulentní.

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad (16.13)$$

w... rychlost proudění [m.s⁻¹]

ν ... kinematická viskozita [m².s⁻¹]

L... charakteristický rozměr [m]

Prandtlovo kritérium

Obsahuje pouze fyzikální charakteristiky tekutiny

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (16.14)$$

Grashofovo kritérium

$$Gr = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \gamma \cdot \Delta t \quad (16.15)$$

Koeficient objemové teplotní roztažnosti

$$\gamma = \frac{1}{T} \quad [1 \cdot K^{-1}] \quad (16.16)$$

16.3 Přenos tepla zářením (sáláním)

Tepelné záření nevyžaduje hmotné prostředí. Přenos probíhá pomocí elektromagnetického vlnění, které vzniká v důsledku tepelného stavu těles.

Energie vyzařovaná tělesy prudce vzrůstá s jejich teplotou. Tato energie se počítá pomocí Stefan-Bolzmannova zákona a nazývá se intenzita vyzařování

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (16.17)$$

ε ... experimentálně určený emisní součinitel

σ ... Stefan-Bolzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

T ... teplota povrchu tělesa (absolutní) [K]

Uzavřená soustava tvořená dvěma povrchy

Přenos tepla mezi dvěma šedými povrchy s přímým ozářením

$$Q_{1,2} = Q_{pohlcd1,2} \cdot Q_{pohlcd2,1} = \varepsilon_{1,2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot S_1 \quad [W] \quad (16.18)$$

$\varepsilon_{1,2}$... stupeň černosti soustavy

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (16.19)$$

[6],[7]

17. Výpočty veličin spalování

Výpočty vychází z kapitoly 14.

17.1 Rozbor paliva:

Druh paliva	Dřevo měkké
Voda [%]	20,99
Popel [%]	2,34
Uhlík [%]	39,12
Vodík [%]	5,32
Síra [%]	0,00
Dusík [%]	0,14
Kyslík [%]	32,07
Spalné teplo [MJ/kg]	16,69
Výhřevnost [MJ/kg]	15,01

Tab. 17.1 Rozbor paliva

17.2 Teoretické množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva

$$O_{min} = 1,865 \cdot C + 5,553 \cdot H + 0,699 \cdot S - 0,700 \cdot O$$

$$O_{min} = 1,865 \cdot 39,12 \% + 5,553 \cdot 5,32 \% - 0,7 \cdot 32,07 \%$$

$$O_{min} = 0,801 \frac{m_{NO_2}^3}{kg \text{ pal}}$$

17.3 Teoretické množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{21}$$

$$L_{min} = \frac{0,801}{0,21}$$

$$L_{min} = 3,811 \frac{m_{N_{vz}}^3}{kg \text{ pal}}$$

17.4 Stechiometrický objem suchých spalin

$$V_{Atrmin} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + O_{min} \cdot \frac{0,79}{0,21}$$

$$V_{Atrmin} = 1,855 \cdot C + 0,683 \cdot S + 0,796 \cdot N + O_{min} \cdot \frac{0,79}{0,21}$$

$$V_{Atr\ min} = 1,855 \cdot 39,12\ \% + 0 + 0,796 \cdot 0,14\ \% + 0,801 \cdot \frac{0,79}{0,21}$$

$$V_{Atr\ min} = 3,738 \frac{m_{Nsp}^3}{kg\ pal}$$

17.5 Přebytek vzduchu

$$\alpha = 1 + \frac{V_{Atr\ min}}{L_{min}} \cdot \frac{O_2'}{21 - O_2}$$

$$\alpha = 1 + \frac{3,738}{3,811} \cdot \frac{10}{21 - 12,23}$$

$$\alpha = 2,11$$

17.6 Spaliny:

Oxid uhličitý

$$V_{CO_2} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,39}{12,01} \cdot 39,12\ \%$$

$$V_{CO_2} = 0,729 \frac{m_{NCO_2}^3}{kg\ pal}$$

Dusík

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot N$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot 0,14\ \%$$

$$V_{N_2} = 0,001 \frac{m_{NCO_2}^3}{kg\ pal}$$

Voda

$$V_{H_2O} = \frac{44,80}{4,032} \cdot H + \frac{22,4}{18} \cdot W$$

$$V_{H_2O} = \frac{44,80}{4,032} \cdot 5,32\ \% + \frac{22,4}{18} \cdot 20,99\ \%$$

$$V_{H_2O} = 0,852 \frac{m_{NH_2O}^3}{kg\ pal}$$

Maximální koncentrace oxidu uhličitého

$$CO_{2max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{Atrmin}}$$

$$CO_{2max} = \frac{0,729}{3,738}$$

$$CO_{2max} = 19,5 \%$$

Objem suchých spalin skutečně vzniklých

$$V_{Atr} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{(CO_2 + SO_2)' + CO'}$$

$$V_{Atr} = \frac{0,729}{(12,23\%) + 1700 \text{ ppm}}$$

$$V_{Atr} = 5,852 \frac{m^3_{Nsp}}{kg \text{ pal}}$$

17.7 Ostatní veličiny

Teplota spalin	°C	195,25
Spotřeba paliva	kg/h	7,5
Teplota výstupní vody	°C	68,64
Teplota vstupní vody	°C	54,15
Teplota chladící vody	°C	8,36
Průtok vody smyčkou	m ³ /h	0,375
Tah za kotlem	Pa	25
Teplota prostředí	°C	22,43

Tab. 17.2 Ostatní veličiny

17.8 Výpočet jmenovitého tepelného výkonu

$$Q_N = w_1 \cdot c_{w1} \cdot (t_w - t_E)$$

Výpočet měrné tepelné kapacity vody při dané teplotě

$$c_{w1} \dots \text{střední měrná tepelná kapacita vody při } \frac{t_w + t_E}{2} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$Q_N = w_1 \cdot c_{w1} \cdot (t_w - t_E)$$

$$Q_N = 0,104 \cdot 4175 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (68,64^\circ\text{C} - 8,36^\circ\text{C})$$

$$Q_N = 26215 \text{ W}$$

Tepelný příkon

$$Q_B = B \cdot H_U$$

$$Q_B = 0,00208 \frac{kg}{s} \cdot 15100000 \frac{J}{kg}$$

$$Q_B = 31270 \text{ W}$$

17.9 Výpočet poměrných tepelných ztrát**Účinnost kotle přímá metoda**

$$\eta_K = \frac{Q}{Q_b}$$

$$\eta_K = \frac{26215 \text{ W}}{31270 \text{ W}}$$

$$\eta_K = 83,8 \%$$

Nepřímá metoda

$$\eta_K = 1 - q_A - q_U - q_S - q_C$$

Poměrná ztráta citelným teplem spalín

$$q_A = (V_{Atr} \cdot C_{pmAtr} + V_w \cdot C_{pmH_2O}) \cdot (t_A - t_L) \cdot \frac{1}{H_V}$$

$$C_{pmAtr} = \left[0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right)^2 + 0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right) - \right. \\ \left. 0,14 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{CO_2}{100\%} \right) + 0,3 \cdot \left[\left(\frac{t_A}{1000^\circ C} - 0,2 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{CO_2}{100\%} \right)^2 \right]$$

$$C_{pmAtr} = \left[0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{195,25}{1000^\circ C} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{195,25}{1000^\circ C} \right)^2 + 0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{195,25}{1000^\circ C} \right) - \right. \\ \left. 0,14 \cdot \left(\frac{195,25}{1000^\circ C} \right)^2 \right] \cdot \frac{12,23\%}{100\%} + 0,3 \cdot \left[\left(\frac{195,25}{1000} - 0,2 \cdot \left(\frac{195,25}{1000} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{12,23\%}{100} \right)^2 \right]$$

$$C_{pmAtr} = 0,378 \text{ Wh} \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$$

$$C_{pmAtr} = 1364,04 \text{ J} \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$$

Střední měrná tepelná kapacita vody

$$C_{pmH_2O} = 0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_A}{1000^\circ C} \right)^2$$

$$C_{pmH_2O} = 0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{195,25}{1000^\circ C} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{195,25}{1000^\circ C} \right)^2$$

$$C_{pmH_2O} = 0,422 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$C_{pmH_2O} = 1521,78 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$q_A = (5,852 \cdot 1364,04 + 0,851 \cdot 1521,78) \cdot (195,25 - 22,43) \cdot \frac{1}{150100000}$$

$$q_A = 10,68 \%$$

Poměrná tepelná ztráta q_U

$$q_U = CO \cdot V_{Atr} \cdot \frac{12,64}{H_U}$$

$$q_U = 0,175 \cdot 852 \cdot \frac{12,64}{15010000}$$

$$q_U = 0,83 \%$$

Poměrná tepelná ztráta q_s

$$Q_x = F_x \cdot \alpha \cdot (t_m - t_L)$$

Výpočet pro vrchní dvířka

$$Q_1 = F_1 \cdot \alpha \cdot (t_m - t_L)$$

$$Q_1 = 0,341 \cdot 10 \cdot (47,5 - 22,43)$$

$$Q_1 = 85,56 \text{ W}$$

Tabulka ztrát sáláním

	Část kotle	Obsah	t_m	t_L	α	Q_x
		m ²	°C	°C	W.m ⁻² .K ⁻¹	W
1	Vrchní dvířka	0,34131	47,5	22,43	10	85,565
2	Spodní dvířka	0,51408	48,8	22,43	10	135,563
3	Vrch kotle	0,36066	32,8	22,43	8,5	31,790
4	Mezi dvířky	0,15211	60	22,43	11	62,862
5	Levý bok	0,72947	36	22,43	9	89,090
6	Pravý bok	0,72947	37,5	22,43	9	98,938
7	Vrch zadního dílu	0,10117	50	22,43	10	27,892
8	Prostředek zadního dílu	0,41759	64	22,43	11	190,953
9	Kouřovod	0,41898	144	22,43	15	764,032
10	Spodek kotle	0,4781	39	22,43	9	71,2991

Tab. 18.3 Ztráty sáláním

$$\sum_{x=1}^{10} Q_x = 1557,99 \text{ W}$$

$$q_S = \frac{\sum Q_x}{Q_B}$$

$$q_S = \frac{1557,99}{31270,83}$$

$$q_S = 4,98 \%$$

Ztráta mechanickým nedopalem q_C

$$q_C = 32,7 \cdot \frac{c_Z}{Q_N}$$

$$q_C = 32,7 \cdot \frac{0,4}{15,01}$$

$$q_C = 0,87 \%$$

17.10 Účinnost kotle nepřímou metodou

$$\eta_K = 100 - q_A - q_U - q_S - q_C$$

$$\eta_K = 100 - 10,68 - 0,83 - 4,98 - 0,87$$

$$\eta_K = 82,62 \%$$

18. Výpočet sdílení tepla

Výpočty vycházejí z kapitoly 16. Bylo počítáno se základních naměřených hodnot. Teplotu nasávaného vzduchu považuju za teplotu okolního vzduchu 22 °C a teplota na začátku hliníkové trubice, byla změřená dotykovým teploměrem. Rychlost proudění vzduchu jsem naměřil pomocí vrtulkového anemometru.

Teplota nasávaného vzduchu	22	°C
Teplota na začátku hliníkové trubice	140	°C
Rychlost proudění vzduchu na začátku	5,5	m/s

Tab. 19.1 Tabulka vzduchu

Úloha byla rozdělena na 10 dílčích částí, a pro těchto 10 částí bylo spočítáno, kolik energie předaly stěny násypky spalovacímu vzduchu. Celkový výpočet byl rozdělen na 3 druhy:

1. Konvekce
2. Sálání
3. Kondukce- byla zanedbána ve výpočtech

18.1 Konvekce

1/10

Vzduch vstupuje předním plechem do předního dílu násypky. Nasávaný vzduch má teplotu okolí a stěna přední násypky 150°C

$$t_{vz} = 20^{\circ}\text{C} = 293,15 \text{ K}$$

$$t_{stěny} = 150^{\circ}\text{C} = 423,15 \text{ K}$$

$$w = 5,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pomocí tabulek jsem si vyhledal následující hodnoty:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{20^{\circ}\text{C}}$	0,703	-
$Pr_{150^{\circ}\text{C}}$	0,683	-
$\eta_{20^{\circ}\text{C}}$	0,0000181	Pa.s
$\rho_{20^{\circ}\text{C}}$	1,205	kg.m ⁻³
$v_{20^{\circ}\text{C}}$	$1,502 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{20^{\circ}\text{C}}$	0,0259	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Tab. 18.2 Veličiny z tabulek

Hydraulický průměr

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{o}$$

$$d_h = \frac{4 \cdot (0,140 \cdot 0,03)}{2 \cdot (0,140 + 0,03)}$$

$$d_h = 0,04941 \text{ m}$$

Opravný součinitel na neizotermické proudění

$$\varepsilon_t = \left(\frac{T_s}{T} \right)^{-0,55}$$

$$\varepsilon_t = \left(\frac{150 + 273,15}{20 + 273,15} \right)^{-0,55}$$

$$\varepsilon_t = 0,817$$

Opravný součinitel pro oblouky

$$Re'_{kr} = \frac{16,4}{\sqrt{d/R}}$$

$$Re'_{kr} = \frac{16,4}{\sqrt{0,04941/10}}$$

$$Re'_{kr} = 7,37$$

$$Re''_{kr} = 18500 \cdot \left(\frac{d}{2R} \right)^{0,28}$$

$$Re''_{kr} = 23831$$

$$\varepsilon_R = 1$$

Opravný součinitel pro krátké trubky

$$\varepsilon_L = 1,18$$

Reynoldsovo kritérium

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu}$$

$$Re = \frac{5,5 \cdot 0,04941}{1,502 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re = 18091$$

Nusseltovo kritérium

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_R \cdot \varepsilon_L$$

$$Nu = 0,021 \cdot 18091^{0,8} \cdot 0,703^{0,43} \cdot 0,817 \cdot 1 \cdot 1,18$$

$$Nu = 44,32$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L}$$

$$\alpha = 23,23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Energie

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta t$$

$$Q = 23,23 \cdot \frac{0,101 \cdot 0,2}{10} \cdot (150 - 20)$$

$$Q_{1,k} = 61 \text{ W}$$

Hmotnostní průtok vzduchu

$$m = S_{kanál} \cdot w \cdot \rho$$

$$m = (0,140 \cdot 0,03) \cdot 5,5 \cdot 1,205$$

$$m = 0,027 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

2/10

Odted' až do posledního kroku jsou výpočty úplně stejné jen s jinými hodnotami, protože velikosti hledaných hodnot se mění nejvíce s teplotou.

Naměřená rychlost vzduchu musela být přepočítána pro jednotlivé kroky, protože čím je vzduch teplejší, tím má menší hustotu a z toho plyne větší rychlost.

Zadané hodnoty

$$t_{vz} = 33^{\circ}\text{C} = 306,15 \text{ K}$$

$$t_{stěny} = 180^{\circ}\text{C} = 453,15 \text{ K}$$

Přepočet hodnot z tabulek pomocí interpolace

Př. $Pr_{33^{\circ}\text{C}}$

Teplota	Pr
20°C	0,703
40°C	0,699

Hledaná teplota: 33°C

$$Pr_{33^{\circ}\text{C}} = Pr_{20^{\circ}\text{C}} + (t_{33^{\circ}\text{C}} - t_{20^{\circ}\text{C}}) \cdot \frac{Pr_{40^{\circ}\text{C}} - Pr_{20^{\circ}\text{C}}}{t_{40^{\circ}\text{C}} - t_{20^{\circ}\text{C}}}$$

$$Pr_{33^{\circ}\text{C}} = 0,703 + (33^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) \cdot \frac{0,699 - 0,703}{40^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}$$

$$Pr_{33^{\circ}\text{C}} = 0,7004$$

Pro ostatní veličiny probíhá výpočet úplně stejně, jen s jinými hodnotami.

Hodnoty z tabulek:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{33^{\circ}C}$	0,7004	-
$Pr_{180^{\circ}C}$	0,681	-
$\eta_{33^{\circ}C}$	0,00001875	Pa.s
$\rho_{33^{\circ}C}$	1,15495	kg.m ⁻³
$\nu_{33^{\circ}C}$	$1,623 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{33^{\circ}C}$	0,027	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Tab. 18.3 Veličiny z tabulek

Rychlost proudění

$$w = \frac{m}{w_1 \cdot \rho} = \frac{0,027}{5,5 \cdot 1,154}$$

$$w = 5,73 \text{ m.s}^{-1}$$

Vypočtené hodnoty:

Veličina	Hodnota	Jednotka
ε_t	0,805	-
ε_R	1	-
ε_L	1,18	-
Re	17464	-
Nu	42,42	-
α	23	W.m ⁻² .K ⁻¹
$Q_{2,k}$	68,85	W

Tab. 18.4 Vypočtené veličiny 2/10

3/10**Zadané hodnoty**

$$t_{vz} = 46^{\circ}C = 319,15 \text{ K}$$

$$t_{stěny} = 200^{\circ}C = 473,15 \text{ K}$$

Hodnoty z tabulek:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{46^{\circ}C}$	0,6981	-
$Pr_{200^{\circ}C}$	0,68	-
$\eta_{46^{\circ}C}$	0,0000194	Pa.s
$\rho_{46^{\circ}C}$	1,1076	kg.m ⁻³
$\nu_{46^{\circ}C}$	$1,751 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{46^{\circ}C}$	0,02802	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Tab. 18.5 Veličiny z tabulek

Vypočtené hodnoty:

Veličina	Hodnota	Jednotka
w	5,98	m.s ⁻¹
ε_t	0,805	-
ε_R	1	-
ε_L	1,18	-
Re	16879	-
Nu	41,19	-
α	23,36	W.m ⁻² .K ⁻¹
$Q_{3,k}$	72,66	W

Tab. 18.6 Vypočtené veličiny 3/10

4/10**Zadané hodnoty**

$$t_{vz} = 60^{\circ}C = 333,15 \text{ K}$$

$$t_{stěny} = 200^{\circ}C = 473,15 \text{ K}$$

Hodnoty z tabulek:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{60^{\circ}C}$	0,696	-
$Pr_{200^{\circ}C}$	0,68	-
$\eta_{60^{\circ}C}$	0,0000201	Pa.s
$\rho_{60^{\circ}C}$	1,06	kg.m ⁻³
$\nu_{60^{\circ}C}$	$1,896 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{60^{\circ}C}$	0,029	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Tab. 18.7 Veličiny z tabulek

Vypočtené hodnoty:

Veličina	Hodnota	Jednotka
w	6,25	m.s ⁻¹
ε_t	0,824	-
ε_R	1	-
ε_L	1,18	-
Re	16291	-
Nu	40,91	-
α	24,01	W.m ⁻² .K ⁻¹
$Q_{4,k}$	67,91	W

Tab. 18.8 Vypočtené veličiny 4/10

5/10**Zadané hodnoty**

$$t_{vz} = 73^{\circ}C = 346,15 \text{ K}$$

$$t_{stěny} = 200^{\circ}C = 473,15 \text{ K}$$

Hodnoty z tabulek:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{73^{\circ}C}$	0,6934	-
$Pr_{200^{\circ}C}$	0,68	-
$\eta_{73^{\circ}C}$	0,00002075	Pa.s
$\rho_{73^{\circ}C}$	1,011	kg.m ⁻³
$\nu_{73^{\circ}C}$	$2,032 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{73^{\circ}C}$	0,0299	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

*Tab. 18.9 Veličiny z tabulek***Vypočtené hodnoty:**

Veličina	Hodnota	Jednotka
w	6,49	m.s ⁻¹
ε_t	0,851	-
ε_R	1	-
ε_L	1,18	-
Re	15781	-
Nu	41,13	-
α	24,95	W.m ⁻² .K ⁻¹
$Q_{5,k}$	64,013	W

*Tab. 18.10 Vypočtené veličiny 5/10***6/10****Zadané hodnoty**

$$t_{vz} = 90^{\circ}C = 363,15 K$$

$$t_{stěny} = 200^{\circ}C = 473,15 K$$

Hodnoty z tabulek:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{90^{\circ}C}$	0,69	-
$Pr_{200^{\circ}C}$	0,68	-
$\eta_{90^{\circ}C}$	0,0000215	Pa.s
$\rho_{90^{\circ}C}$	1,15495	kg.m ⁻³
$\nu_{90^{\circ}C}$	$2,212 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{90^{\circ}C}$	0,0313	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

*Tab. 18.11 Veličiny z tabulek***Vypočtené hodnoty:**

Veličina	Hodnota	Jednotka
w	6,81	m.s ⁻¹
ε_t	0,864	-
ε_R	1	-
ε_L	1,18	-
Re	15230	-
Nu	40,50	-
α	25,65	W.m ⁻² .K ⁻¹
$Q_{6,k}$	57,01	W

*Tab. 18.12 Vypočtené veličiny 6/10***7/10****Zadané hodnoty**

$$t_{vz} = 100^{\circ}C = 373,15 K$$

$$t_{stěny} = 200^{\circ}C = 473,15 K$$

Hodnoty z tabulek:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{100^{\circ}C}$	0,688	-
$Pr_{200^{\circ}C}$	0,68	-
$\eta_{100^{\circ}C}$	0,0000219	Pa.s
$\rho_{100^{\circ}C}$	0,945	kg.m ⁻³
$\nu_{100^{\circ}C}$	$2,317 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{100^{\circ}C}$	0,0321	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

*Tab. 18.13 Veličiny z tabulek***Vypočtené hodnoty:**

Veličina	Hodnota	Jednotka
w	7,01	m.s ⁻¹
ε_t	0,877	-
ε_R	1	-
ε_L	1,18	-
Re	14952	-
Nu	40,49	-
α	26,31	W.m ⁻² .K ⁻¹
$Q_{7,k}$	53,14	W

*Tab. 18.14 Vypočtené veličiny 7/10***8/10****Zadané hodnoty**

$$t_{vz} = 115^{\circ}C = 388,15 \text{ K}$$

$$t_{stěny} = 200^{\circ}C = 473,15 \text{ K}$$

Hodnoty z tabulek:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{115^{\circ}C}$	0,6865	-
$Pr_{200^{\circ}C}$	0,68	-
$\eta_{115^{\circ}C}$	0,0000226	Pa.s
$\rho_{115^{\circ}C}$	0,90975	kg.m ⁻³
$\nu_{115^{\circ}C}$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{115^{\circ}C}$	0,0330	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

*Tab. 18.15 Veličiny z tabulek***Vypočtené hodnoty:**

Veličina	Hodnota	Jednotka
w	7,28	m.s ⁻¹
ε_t	0,896	-
ε_R	1	-
ε_L	1,18	-
Re	14505	-
Nu	40,30	-
α	26,98	W.m ⁻² .K ⁻¹
$Q_{8,k}$	46,32	W

*Tab. 18.16 Vypočtené veličiny 8/10***9/10****Zadané hodnoty**

$$t_{vz} = 130^{\circ}C = 403,15 \text{ K}$$

$$t_{stěny} = 200^{\circ}C = 473,15 \text{ K}$$

Hodnoty z tabulek:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{130^{\circ}C}$	0,685	-
$Pr_{200^{\circ}C}$	0,68	-
$\eta_{130^{\circ}C}$	0,00002325	Pa.s
$\rho_{130^{\circ}C}$	0,876	kg.m ⁻³
$\nu_{130^{\circ}C}$	$2,654 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{130^{\circ}C}$	0,0321	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

*Tab. 18.17 Veličiny z tabulek***Vypočtené hodnoty:**

Veličina	Hodnota	Jednotka
w	7,56	m.s ⁻¹
ε_t	0,915	-
ε_R	1	-
ε_L	1,18	-
Re	14084	-
Nu	40,16	-
α	26,094	W.m ⁻² .K ⁻¹
$Q_{9,k}$	36,89	W

*Tab. 18.18 Vypočtené veličiny 9/10***10/10****Zadané hodnoty**

$$t_{vz} = 140^{\circ}C = 413,15 \text{ K}$$

$$t_{stěny} = 200^{\circ}C = 473,15 \text{ K}$$

Hodnoty z tabulek:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$Pr_{140^{\circ}C}$	0,684	-
$Pr_{200^{\circ}C}$	0,68	-
$\eta_{140^{\circ}C}$	0,0000237	Pa.s
$\rho_{140^{\circ}C}$	0,854	kg.m ⁻³
$\nu_{140^{\circ}C}$	$2,775 \cdot 10^{-5}$	m ² .s ⁻¹
$\lambda_{140^{\circ}C}$	0,0321	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

*Tab. 18.19 Veličiny z tabulek***Vypočtené hodnoty:**

Veličina	Hodnota	Jednotka
w	7,76	m.s ⁻¹
ε_t	0,928	-
ε_R	1	-
ε_L	1,18	-
Re	13817	-
Nu	40,09	-
α	26,04	W.m ⁻² .K ⁻¹
$Q_{10,k}$	31,56	W

*Tab. 18.20 Vypočtené veličiny 10/10***Celkem konvekce**

$$Q_{celk.k} = \sum_{i=1}^{10} Q$$

$$Q_{celk.k} = 61 \text{ W} + 68,85 \text{ W} + 72,66 \text{ W} + 67,91 \text{ W} + 64,01 \text{ W} + 57,01 \text{ W} + 53,14 \text{ W} \\ + 46,32 \text{ W} + 36,89 \text{ W} + 31,56 \text{ W}$$

$$Q_{celk,k} = 559,41 \text{ W}$$

18.2 Sálání**1/10**

Tato část je jednodušší. Teploty stěn a teplotu vzduchu použiju stejnou jako u konvekce

$$t_{vz} = 20^{\circ}C = 293,15 \text{ K}$$

$$t_{stěny} = 150^{\circ}\text{C} = 423,15 \text{ K}$$

Emisivita

Násypka je složená z plechu, který je natřen černou barvou tudíž jsem emisivitu našel v tabulce

Plech natřený černou barvou

$$\varepsilon = 0,85$$

Stupeň černosti soustavy

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,85} - 1}$$

$$\varepsilon_{1,2} = 0,739$$

Povrch dílčího kanálu

$$S = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{10}$$

$$S = \frac{(0,4.0,2) + (0,33.0,2) + (0,33.0,2)}{10}$$

$$S = 0,0212 \text{ m}^2$$

Přenos tepla na 1 m²

$$q = \varepsilon_{1,2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$q = 0,739 \cdot 5,67 \cdot (150^4 - 20^4)$$

$$q = 1034,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = \frac{q}{t_1 - t_2}$$

$$\alpha_s = \frac{1034,13}{150 - 20}$$

$$\alpha_s = 7,954 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Přenos tepla

$$Q = \alpha \cdot (t_1 - t_2) \cdot S$$

$$Q = 7,954 \cdot (150 - 20) \cdot 0,0212$$

$$Q_{1s} = 21,92 \text{ W}$$

2/10**Zadané hodnoty**

$$t_{vz} = 33^{\circ}\text{C} = 306,15\text{ K}$$

$$t_{stěny} = 180^{\circ}\text{C} = 453,15\text{ K}$$

$$\varepsilon = 0,85$$

$$\varepsilon_{1,2} = 0,739$$

$$S = 0,0212\text{ m}^2$$

Zadané hodnoty jsou stejné již pro všechny ostatní výpočty v sálání. Mění se pouze teplota stěny a vzduchu.

Vypočtené hodnoty

$$q = 1398,98\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

$$\alpha_s = 9,51\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$$

$$Q_{2s} = 29,65\text{ W}$$

Zbývající kroky

3/10		4/10		5/10	
Zadané					
t_{vz}	$46^{\circ}C = 319,15\ K$	$60^{\circ}C = 333,15\ K$	$73^{\circ}C = 346,15\ K$		
$t_{stěny}$	$200^{\circ}C = 473,15\ K$	$200^{\circ}C = 473,15\ K$	$200^{\circ}C = 473,15\ K$		
Vypočtené					
q	$1665,12\ W.m^{-2}$	$1584,21\ W.m^{-2}$	$1498,7\ W.m^{-2}$		
α_s	$10,815\ W.m^{-2}.K^{-1}$	$11,31\ W.m^{-2}.K^{-1}$	$11,8\ W.m^{-2}.K^{-1}$		
Q_{xs}	35,31 W	33,58 W	31,77 W		

Tab. 18.21 Vypočtené veličiny

6/10		7/10	8/10
Zadané			
t_{vz}	$90^{\circ}\text{C} = 363,15\text{ K}$	$100^{\circ}\text{C} = 373,15\text{ K}$	$115^{\circ}\text{C} = 388,15\text{ K}$
$t_{stěny}$	$200^{\circ}\text{C} = 473,15\text{ K}$	$200^{\circ}\text{C} = 473,15\text{ K}$	$200^{\circ}\text{C} = 473,15\text{ K}$
Vypočtené			
q	$1371,52\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$1287,86\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$1149,12\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
α_s	$12,46\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$12,87\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$13,51\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Q_{xs}	$29,07\text{ W}$	$27,31\text{ W}$	$24,36\text{ W}$

Tab. 18.22 Vypočtené veličiny

9/10		10/10	
Zadané			
t_{vz}	$130^{\circ}\text{C} = 403,15\text{ K}$	$140^{\circ}\text{C} = 413,15\text{ K}$	
$t_{stěny}$	$200^{\circ}\text{C} = 473,15\text{ K}$	$200^{\circ}\text{C} = 473,15\text{ K}$	
Vypočtené			
q	$993\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$879,33\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	
α_s	$14,19\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$14,65\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	
Q_{xs}	$21,05\text{ W}$	$18,64\text{ W}$	

Tab. 18.23 Vypočtené veličiny

Celkový přenos tepla sáláním

$$Q_{celk,s} = \sum_{i=1}^{10} Q_{xs}$$

$$Q_{celk,s} = 21,92 + 29,65 + 35,31 + 33,58 + 31,77 + 29,07 + 27,31 + 24,36 + 21,05 + 18,64$$

$$Q_{celk,s} = 272,68\text{ W}$$

18.3 Přenos tepla celkem

$$Q_{celkem} = Q_{celk,k} + Q_{celk,s}$$

$$Q_{celkem} = 559,41 + 272,68$$

$$Q_{celkem} = 832,09\text{ W}$$

Z výpočtů vidíme, že největší přenos tepla je konvekcí, pak sálání.

19. Emise

19.1 Před úpravou

Emise na výstupu z kotle

Emise	
O ₂	12,01 %
CO ₂	8,96 %
CO	1370 ppm
OGC	8,8 ppm
NO _x	70 ppm

Tab. 19.1 Emise na výstupu z kotle

Koncentrace emisí v mg/m³ přepočtené na 10% O₂

Emise	
O ₂	12,01 %
CO ₂	8,96 %
CO	2150 mg/m ³
OGC	17,6 mg/m ³
NO _x	187 mg/m ³

Tab. 19.2 Přepočtené emise

Ostatní veličiny

Teplota spalin	195,25	°C
Spotřeba paliva	7,5	kg/h
Teplota výstupní vody	68,64	°C
Teplota vstupní vody	54,15	°C
Teplota chladicí vody	8,36	°C
Průtok vody smyčkou	0,375	m ³ /h
Tah za kotlem	25	Pa
Teplota prostředí	22,43	°C
Výkon	26,31	kW
Účinnost	82,62	%

Tab. 19.3 Ostatní veličiny

19.2 Parametry po úpravě

Stechiometrie spalování

$$O_{min} = 0,801 \frac{m_{NO_2}^3}{kg \text{ pal}}$$

$$L_{min} = 3,811 \frac{m_{N_{vz}}^3}{kg \text{ pal}}$$

$$V_{Atr \min} = 3,738 \frac{m_{Nsp}^3}{kg \text{ pal}}$$

Přebytek vzduchu

$$\alpha = 1,8$$

Spaliny

$$V_{CO_2} = 0,729 \frac{m_{NCO_2}^3}{kg \text{ pal}}$$

$$V_{N_2} = 3,01 \frac{m_{NCO_2}^3}{kg \text{ pal}}$$

$$V_{H_2O} = 0,852 \frac{m_{NH_2O}^3}{kg \text{ pal}}$$

$$CO_{2max} = 19,41 \%$$

Suché spaliny skutečně vzniklé

$$V_{Atr} = 6,064 \frac{m_{Nsp}^3}{kg \text{ pal}}$$

Tepelný příkon

$$Q_B = 31270 \text{ W}$$

Účinnost přímou metodou

$$\eta_K = 90,69 \%$$

Ztráta komínová

$$q_A = 9,57 \%$$

Ztráta plynným nedopalem

$$q_U = 0,211 \%$$

Ztráta mechanickým nedopalem

$$q_G = 0,87 \%$$

Ztráta sáláním

$$q_S = 2,01 \%$$

Účinnost nepřímou metodou

$$\eta_K = 87,84 \%$$

19.3 Emise po úpravě**Emise na výstupu z kotle**

Emise	
O ₂	8,85 %
CO ₂	11,93 %
CO	362 ppm
OGC	12 ppm
NO _x	88 ppm

*Tab. 19.4 Emise po změně***Koncentrace emisí v mg/m³ přepočtené na 10% O₂**

Emise	%
O ₂	8,85
CO ₂	11,93
CO	416 mg/m ³
OGC	13 mg/m ³
NO _x	163 mg/m ³

*Tab. 19.5 Emise přepočtené***Ostatní veličiny**

Teplota spalin	170	°C
Spotřeba paliva	7,5	kg/h
Teplota výstupní vody	77,85	°C
Teplota vstupní vody	60,53	°C
Teplota chladící vody	9,5	°C
Průtok vody smýčkou	0,366	m ³ /h
Tah za kotlem	25	Pa
Teplota prostředí	26,01	°C
Výkon	25,02	kW
Účinnost	87,84	%

Tab. 19.6 Ostatní veličiny

20. Porovnání

V této kapitole jsou porovnány výsledky měření před změnou a po změně. Byly porovnány pouze nejdůležitější veličiny. Zde patří emise CO, OGC, teplota spalin, výkon a účinnost.

Emise CO byly, 2150 mg/m^3 a OGC $17,6 \text{ mg/m}^3$, před změnou. Po změně bylo dosaženo výrazného snížení emisí CO 416 mg/m^3 a OGC 13 mg/m^3 . U emisí CO jde o snížení o 81% a u emisí OGC o 26%. Tudíž bylo dosaženo Emisní třídy 5 z původní třetí třídy.

Teplota spalin a účinnost spolu přímo souvisí. Protože čím vyšší teplota spalin, tím nižší účinnost a naopak. Původně bylo dosaženo teploty spalin $195,25 \text{ }^\circ\text{C}$ a komínová ztráta činila 10,68% po úpravě na $170 \text{ }^\circ\text{C}$ a ztráta byla snížena na 9,06 %.

Z tohoto výsledku vyplývá nakonec celková účinnost, která byla 82,62 %. Po změně bylo dosaženo 87,84 %. Díky poklesu CO, klesla také ztráta plynným nedopalem, a díky úpravě kouřového nástavce, kde byla přidána izolace a krycí plechy byla snížena ztráta sáláním z 4,98% na 2,01%. Aby byla splněna Emisní třída 5, tak musí být splněn nejen požadavky na emise, ale také na účinnost. Minimální účinnost je 87%, Těto minimální účinnosti bylo dosaženo.

Když porovnáme výkon před a po změně. Tak průměrný výkon před změnou byl 26,31 kW a po změně 28,36 kW.

21. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo, zjistit, jak se změní spalování v kotli Hefaistos P1E 30 kW, tím, že bude změněno proudění spalovacího vzduchu. Jde o zplyňovací kotel na dřevo. Palivem je hnědé dřevo o vlhkosti max. 20%.

První část, je teoretická, věnuje se výrobcům zplyňovacích kotlů, samotnému kotli Hefaistos od firmy Viadrus. Dále je zde podrobně popsán proces ve zplyňovacím kotli a veškerá potřebná teorie okolo zplyňování.

V druhé části jsem se zabýval stechiometrií spalování obecně a výpočty. První výpočet se zabýval účinností kotle dle ČSN EN 303-5. Dále jsem se zabýval výpočtem sdílením tepla mezi stěnami násypky a spalovacím vzduchem. V závěru práce jsem provedl porovnání emisí a ostatních veličin, mezi které patří teplota spalin, výkon, před změnou a po změně. Před změnou bylo na kotli dosaženo hodnoty 2150 mg/m³ pro CO, účinnosti 82,62 % výkon 26,31 kW. Po úpravě bylo dosaženo hodnoty 416 mg/m³ pro CO a účinnost 87,84 %, výkon 28,36 kW.

Třetí část mé práce byla praktická část. V této části jsem si vyrobil potřebné součásti k úpravě. V dalším kroku byly díly namontovány na kotli a byly provedené zkoušky kotle podle ČSN 303-5. Poté jsem tyto součásti nakreslil v programu Autodesk Inventor a vytvořil výkresovou dokumentaci.

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michal Stáňa Ph.D. za účinnou pomoc a rady při zpracovávání mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat všem spolupracovníkům z Výzkumu a Vývoje ve společnosti Viadrus a.s., hlavně bych chtěl poděkovat kolegovi Ota Gruščík, který mi pomohl udělat úpravy kotle.

V Ostravě: 19.5. 2014



.....
(podpis studenta)

22. Použitá literatura

- [1] ČSN 303-5:2012. *Kotle pro ústřední vytápění-Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW- Terminologie, požadavky, zkoušení a značení*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [2] ČSN EN 304. *Kotle pro ústřední vytápění. Předpisy pro zkoušení kotlů pro ústřední vytápění s rozprašovacími hořáky na kapalná paliva*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [3] ČSN 07 0240. *Teplovodní a nízkotlaké parní kotle*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [4] Lyčka Z., *Dřevní peleta II*. Vydalo LING vydavatelství, Krnov v roce 2011.
- [5] Koloničný J. a spol., *Kotle malých výkonů na pevná paliva*, Vydala Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum, Ostrava 2011
- [6] Kadlec Z., *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. Vydalo Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, Ostrava 2009
- [7] Kadlec Z., *Základy sdílení tepla*. Vydalo Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, Ostrava 2009
- [8] http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Pdf/VlastnostiBiomasy.pdf- Vlastnosti Biomasy
- [9] <http://vec.vsb.cz/cz> Ing. Jiří Horák, Ph.D., *Úvod do teorie spalování tuhých paliv*
- [10] www.tzb-info.cz
- [11] www.cs.wikipedia.org

23. Seznam příloh

- Příloha č. 1 Nástavec kouřový sestava.pdf, číslo výkresu KLI0022_DP_01, Výkres A2
- Příloha č. 2 Přední díl sestava.pdf, číslo výkresu KLI0022_DP_02, Výkres A3
- Příloha č. 3 Zadní díl svařenec.pdf, číslo výkresu KLI0022_DP_03, Výkres A3
- Příloha č. 4 Svařenec bok.pdf, číslo výkresu KLI0022_DP_04, Výkres A3
- Příloha č. 5 Kotel zepředu.pdf, číslo výkresu KLI0022_DP_05, Výkres A2
- Příloha č. 6 Kotel zezadu.pdf, číslo výkresu KLI0022_DP_06, Výkres A2